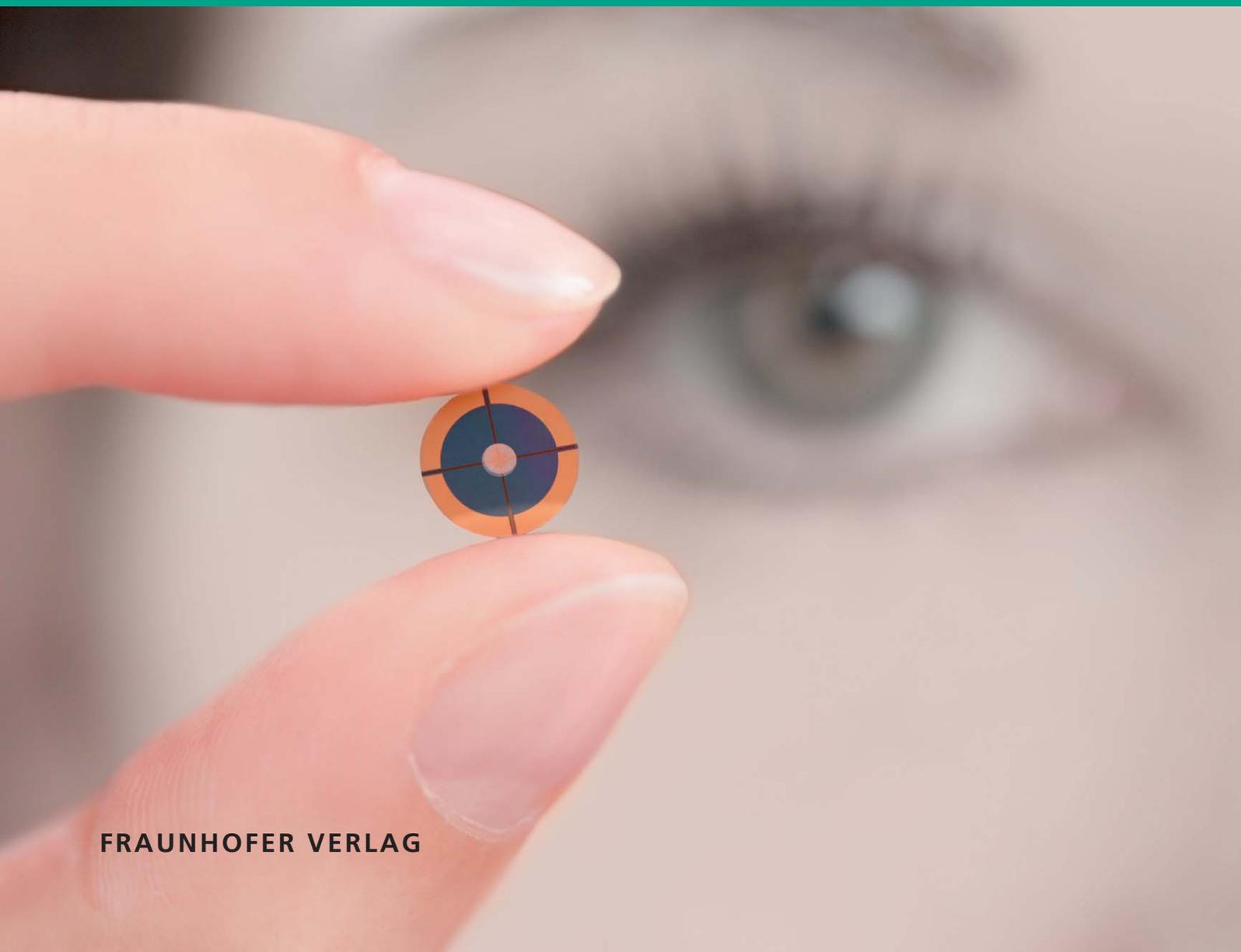


Verena Zürbig

PIEZO-AKTUIERTE MIKRO-OPTO-ELEKTRO- MECHANISCHE SYSTEME FÜR AKTIVE MIKROOPTIK



Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik IAF

Science for Systems

Band 29

Verena Zürbig

**Piezo-aktuierte mikro-opto-elektro-
mechanische Systeme für aktive Mikrooptik**

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für
Angewandte Festkörperphysik IAF
Tullastraße 72
79108 Freiburg
Telefon 0761/5159-0
Telefax 0761/5159-400
E-Mail info@iaf.fraunhofer.de
URL www.iaf.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.
ISBN (Print): 978-3-8396-1132-6

D 25

Zugl.: Freiburg/Brsg, Univ., Diss. 2016

Titelbild: © Fraunhofer IAF / Korn

Umschlaggestaltung: Fraunhofer IAF
Druck: Fraunhofer Verlag Mediendienstleistung

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2017

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Telefax 07 11 9 70-25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

**Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der
Technischen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg im Breisgau**

**Piezo-aktuierte mikro-opto-elektro-
mechanische Systeme für
aktive Mikrooptik**

Verena Zürbig

01.02.2016

Dekan

Prof. Dr. Georg Lausen

Gutachter

1. Gutachter: Prof. Dr. Oliver Ambacher
2. Gutachter: Prof. Dr. Stefan Sinzinger

Datum der mündlichen Prüfung

19.08.2016

Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit waren Gegenstand verschiedener Veröffentlichungen und Vorträge. Eine Liste der Publikationen befindet sich auf den Seiten 169 bis 173.

Für meinen Vater

Kurzzusammenfassung

Die Mikrooptik hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen aufgrund des wachsenden Bedarfs an miniaturisierten optischen Systemen. Neue, flexible mikrooptische Bauelemente wurden erforscht und in der Kommunikationstechnik, in Lasersystemen, in der Medizin und in der Halbleiterindustrie erfolgreich etabliert. Darüber hinaus existieren eine Vielzahl an aktiven mikrooptischen Systemen, welche die optischen Eigenschaften während des Betriebs gezielt einstellen oder nachregeln können. Einen großen Forschungsschwerpunkt stellen hierbei aktive Mikrolinsen dar, die in Handykameras, Endoskopen und optischen Abtastern klassische starre Linsensysteme ersetzen können.

In der vorliegenden Arbeit werden neuartige, adaptive Membran-basierte Mikrolinsen entwickelt und charakterisiert. Die meisten bisher bekannten verstimmbaren Mikrolinsen werden über externe Aktoren betrieben und ermöglichen ausschließlich eine kontrollierte Änderung der Brennweite. Darüber hinaus werden teilweise hohe Versorgungsspannungen und lange Reaktionszeiten zur Ansteuerung der Linse benötigt. Im Gegensatz dazu wird bei den hier vorgestellten verstimmbaren Mikrolinsen der piezoelektrische Aktor direkt in die Linsenmembran integriert. Dadurch wird eine kompakte Bauweise und eine Integration in andere optische Systeme ermöglicht. Die Änderung der Oberflächenkrümmung wird hierbei durch den unimorphen Aktuierungsmechanismus, einer Kombination aus einer piezoelektrisch aktiven und einer passiven elastischen Schicht, realisiert. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuartiges Linsendesign entwickelt, das durch die Realisierung der Topelektroden als unabhängige Sektoren sowohl eine sphärische als auch eine asphärische Verformung der Linsenoberfläche ermöglicht. Dadurch kann die adaptive Mikrolinse zur Feineinstellung des Fokus oder als Korrektor für Abbildungsfehler eingesetzt werden.

Für die Herstellung der adaptiven Mikrolinsen werden Materialkombinationen aus Aluminiumnitrid (AlN) und Siliziumnitrid (Si_xN_y) sowie aus AlN und nanokristallinem Diamant (NCD) getestet und deren Eignung für Membran-basierte Mikrolinsen diskutiert. Da die unimorphen Dünnschichtmembranen eine hohe Transparenz im sichtbaren Spektralbereich, eine hohe mechanische Stabilität und AlN eine hohe piezoelektrische Leistungsfähigkeit aufweisen müssen, werden die AlN/ Si_xN_y - sowie die AlN/NCD-Heterostrukturen zu Beginn bezüglich ihrer optischen, elastischen und piezoelektrischen Eigenschaften charakterisiert. Anschließend wird die Herstellung der adaptiven Mikrolinsen beschrieben und die theoretisch mögliche Linsenwirkung mithilfe eines elektromechanischen und optischen Modells dargestellt. Die Funktionalität der piezoelektrisch aktuierten Multisegment-Mikrolinsen wird elektromechanisch mit der Weißlichtinterferometrie und der Laser-Doppler-Vibrometrie demonstriert. Hierbei wird erstmalig eine kontrollierte symmetrische und asymmetrische Verformung der Linsenoberfläche mit Reaktionszeiten im μs -Bereich gezeigt. Abschließend wird die optische Leistungsfähigkeit der AlN/ Si_xN_y -Mikrolinse mithilfe eines Wellenfrontsensors untersucht. Dabei wird die gezielte Manipulation der Wellenfront durch die Aktuierung einzelner Sektoren der verstimmbaren Mikrolinse demonstriert.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass die adaptiven piezoelektrisch aktuierten Mikrolinsen eine kontrollierte sphärische und asphärische Verformung der Linsenoberfläche und somit eine integrierte Fokus- und Wellenfrontkorrektur ermöglichen.

Abstract

In the last decades micro-optics has attracted much interest due to the increasing demand for miniaturized optical systems. Novel flexible micro-optical components have been developed and successfully implemented in communication technology, in laser systems, in the medical and in the semiconductor industry. In addition, there are many active micro-optical systems which can adjust or correct the optical properties during operation. A major development field is active micro lenses which can be used in cell phone cameras, endoscopes and optical scanners as replacement for classical macro lens systems.

In the present work, novel, adaptive, membrane-based micro lenses are developed and characterized. Most state-of-the-art micro lenses are driven by external actuators and offer only a controlled change of the focal length. In addition, such micro lenses require high driving voltages and have long response times. In contrast to conventional micro lenses, the piezo actuator of the tunable micro lenses presented here is integrated into the lens structure. Thus, these devices enable a compact design and integration into other complex optical systems. The change of the surface curvature is realized by the unimorph bending mechanism which combines a piezoelectric actuator with an elastic layer. Within the scope of this work a novel lens design is developed which offers a free spheric and aspheric deformation of the lens surface via radially segmented integrated actuators. Thereby, the adaptive micro lens can be used for fast focus correction and as a wave front filter.

For the fabrication of adaptive micro lenses material combinations of aluminum nitride (AlN) and silicon nitride (Si_xN_y) as well as of AlN and nanocrystalline diamond (NCD) are tested and their suitability for membrane-based micro lenses are discussed. Important requirements for the micro lenses are high transparency in the visible spectrum, high mechanical stability and high piezoelectric response. Therefore the AlN/ Si_xN_y unimorph structures as well as the AlN/NCD heterostructures are characterized regarding their optical, elastic and piezoelectric properties. Afterwards the micro fabrication of the adaptive micro lenses and the theoretical lens performance are studied by means of electro-mechanical and optical models. The electro-mechanical performance of the piezo-actuated multisegment micro lenses is analyzed using white light interferometry and laser Doppler vibrometry. It is demonstrated for the first time that these micro lenses enable free spheric and aspheric deformation of the surface with response times in the μs range. Finally, the optical performance of the tunable AlN/ Si_xN_y micro lenses is analyzed using a wavefront sensor system. These experiments show that the wavefront can be efficiently manipulated by independent actuation of individual sectors of the tunable micro lens.

The results of this work reveal that the adaptive piezo-actuated micro lenses offer controlled spherical and aspherical deformations of the lens surface, and therefore, in situ focus and wavefront corrections.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
2	Stand der Forschung	15
2.1	Aktive Mikrooptik	15
2.2	Aktorprinzipien zur Verstimmung von Mikrolinsen	16
2.2.1	Starre verstimmbare Mikrolinsen	16
2.2.2	Flexible verstimmbare Mikrolinsen	23
2.3	Materialsysteme für verstimmbare Membranlinsen	35
3	Design der Bauelemente	37
3.1	Anforderungen an die verstimmbare Mikrolinse	37
3.2	Verwendete Materialsysteme und Materialeigenschaften	37
3.3	Unimorphes Prinzip	40
3.4	Design der adaptiven Mikrolinsen	42
4	Piezoelektrisches AlN	45
4.1	Piezoelektrizität	45
4.2	Eigenschaften von Aluminiumnitrid	47
4.3	Herstellung der AlN-Dünnschichten	48
4.4	Piezoelektrische Eigenschaften der AlN-Dünnschichten	54
5	AlN/Si_xN_y-Mikrolinse	57
5.1	Design der AlN/Si _x N _y -Multisegment-Mikrolinse	57
5.2	Herstellung der Dünnschichten	58
5.3	Elastizität der Einzel- und Heterostrukturen	61
5.4	Optische Eigenschaften der Dünnschichten	69
5.5	Mikrofabrikation und AVT	71
5.6	Simulation der mechanischen Wirkung	76
5.7	Elektromechanische Charakterisierung der AlN/Si _x N _y -Mikrolinse	81
5.8	Wellenfrontmessung mit dem Shack-Hartmann-Sensor	90
6	AlN/NCD-Mikrolinse	97
6.1	Design der AlN/NCD-Multisegment-Mikrolinse	97
6.2	Eigenschaften von Diamant	98
6.3	Nanokristalliner Diamant als transparente Elektrode	100
6.4	Herstellung der Dünnschichten	103
6.5	Elastizität der Einzel- und Heterostrukturen	110
6.6	Optische Eigenschaften der Dünnschichten	112
6.7	Mikrofabrikation	112
6.8	Simulation der mechanischen Wirkung	115
6.9	Elektromechanische Charakterisierung der AlN/NCD-Mikrolinse	116
6.10	Simulation der optischen Wirkung	122

7 Vergleich der verschiedenen Bauelemente	125
8 Zusammenfassung und Ausblick	127
8.1 Zusammenfassung	127
8.2 Ausblick	130
Literaturverzeichnis	133
Abkürzungsverzeichnis	157
A Anhang	163
A.1 Prozessschritte zur Herstellung der AlN/Si _x N _y -Mikrolinse	163
A.2 Prozessschritte zur Herstellung der AlN/NCD-Mikrolinse	164
A.3 Zernike-Polynome	165
Danksagung	167
Publikationen	169

1 Einleitung

In den letzten Jahren steigt der Bedarf an kompakten optischen, sogenannten mikrooptischen Systemen. Die zunehmende Komplexität der optischen Systeme verlangt nach neuartigen Lösungen, welche mit klassischen Ansätzen oftmals nicht realisierbar sind. Gegenwärtig gewinnen neue flexible aktive optische Bauteile zunehmend an Bedeutung. Diese ermöglichen die optischen Eigenschaften der Mikrosysteme während des Betriebs gezielt anzupassen und eröffnen somit neue Möglichkeiten im optischen Systemdesign. Diese miniaturisierten, technischen Systeme können u. a. in Smartphones, in Endoskopiekameras, in der Prozesskontrolle, im Qualitätsmanagement, fürs Robotersehen und in der Mikroskopie eingesetzt werden [1]. Insbesondere in der Mobilfunkbranche können die aktiven Mikrooptiken klassische Linsensysteme der Handykameras ersetzen. Statistiken haben gezeigt, dass im Jahr 2013 in der deutschsprachigen Bevölkerung ab einem Alter von 14 Jahren rund 47 Millionen Personen ein Smartphone oder Handy mit Foto- bzw. Video-Funktion besaßen [2]. Im Jahr 2014 gab es rund 11 Millionen Personen, die häufig die Foto-Video-Funktion ihres Mobiltelefons nutzten [3]. Damit gehört die Kamera heutzutage zu den wichtigsten Funktionen bei Mobiltelefonen. Bisherige Handykameras benötigen mehrere Linsen zur Korrektur der Abbildungsfehler sowie zum Heranzoomen und zum Scharfstellen von Objekten. Die Abmessungen der bisherigen Kamera limitieren die Dicke des Handys und können dem Wunsch nach immer flacheren, kostengünstigen Mobilfunkgeräten mit hoher Bildqualität nicht mehr gerecht werden. Die Miniaturisierung der Kameraoptiken durch die Verwendung von Mikrooptiken spielt hierbei eine entscheidende Rolle für die Zukunft neuer miniaturisierter leistungsfähiger Handykameras. Ein Vorbild für die Entwicklung vieler neuer aktiver Mikrooptiken ist die Natur, insbesondere das menschliche Auge [4]. Optisch betrachtet stellt das Auge eine Kamera dar, die das einfallende Licht eines Objektes als reelles Bild auf die hintere Fläche des Augapfels fokussieren kann. Dabei kann das Auge Gegenstände aus Entfernungen vom Zentimeterbereich bis ins Unendliche abbilden. Das menschliche Auge besteht aus einer weichen und flexiblen Linse, dessen Linsenkrümmung variiert werden kann. Die Realisierung einer Digitalkamera, welche die Funktionen des menschlichen Auges imitiert, ist seit Jahren der Wunsch vieler Ingenieure [1].

Natürliche optische Systeme (Augen) mit mikrooptischen Bauelementen nachzubilden, ist das Ziel des DFG-Schwerpunktprogramms 1337 „Aktive Mikrooptik“. Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Projekts *Adaptives Scannendes Einzelfacettenauge (AdaScan)*, das Teil des Schwerpunktprogrammes ist. Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines künstlichen, integrierten mikrooptischen Einapertur-Auges, das die komplexen Funktionen eines Säugetierauges nachempfendet. Das mikrooptische Gesamtsystem wird in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Ilmenau und der Technischen Universität Kaiserslautern entwickelt. Zusätzlich werden Konzepte und Algorithmen der Bildaufnahme, -verarbeitung und -auswertung erforscht.

Das Säugetierauge kann nur einen kleinen Bildbereich tatsächlich scharf abbilden. Durch die stetige Bewegung des Auges können einzelne Objektbereiche erfasst werden und anschließend zu einem großflächigen scharfen Bild zusammengesetzt werden. Abbildung 1.1 zeigt in Analogie zum menschlichen Auge den schematischen Aufbau des technischen

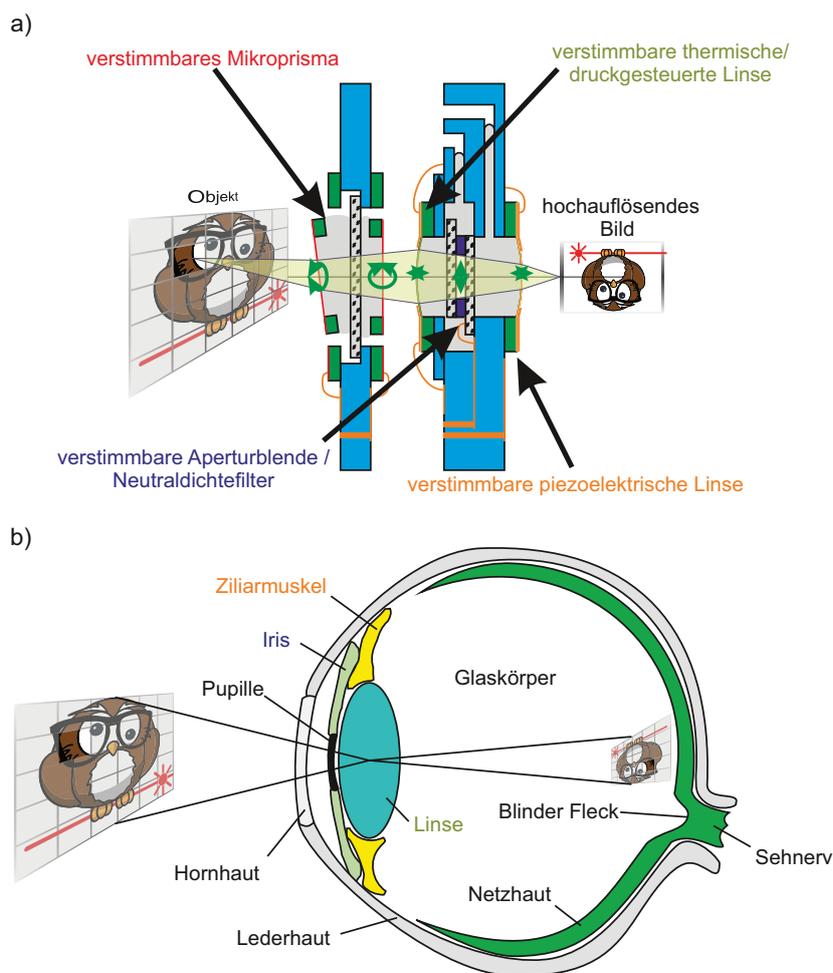


Abbildung 1.1: a) Konzept eines mikrooptischen Systems bestehend aus mehreren integrierten verstellbaren Elementen mit Funktionen in b) Analogie zum menschlichen Auge

Einapertur-Auges bestehend aus vier Einzelkomponenten mit unterschiedlichen Funktionen (Abbildung 1.1a). Starre Glaslinsen sind für mikrooptische Systeme nicht geeignet, da sie nicht flexibel genug sind und ihre optischen Wege zu lang wären. Deshalb werden in diesem Projekt ausschließlich integrierte verstellbare Elemente verwendet, die klein, flexibel und meist aus neuen Materialien bestehen. Die Integration der Aktoren und der optischen Komponenten ermöglicht die Realisierung eines kompakten aktiven optischen Mikrosystems. Ein verstellbares Mikropisma mit variablem Ablenkwinkel realisiert die Abtastung des Objektfeldes [5]. Die im Strahlengang nachfolgende aktive Mikrolinse auf der Basis von dünnen Aluminiumnitrid (AlN)-Membranen ist für das Fokussieren verantwortlich und kann entweder pneumatisch oder thermisch aktuiert werden [5,6]. Die Tiefenschärfe der Abbildung wird durch die verstellbare Aperturblende, der Iris, und die Dynamik durch einen einstellbaren Neutraldichtefilter bestimmt [7–9]. Die abschließende optische Komponente stellt die verstellbare piezoelektrische Mikrolinse dar, die aufgrund der schnellen dynamischen Einstellung zur Fokuskorrektur verwendet werden soll. Darüber hinaus soll durch eine asymmetrische Verformung der Linsenoberfläche eine dynamische Korrektur der Wellenfront und der Abbildungsfehler, die im mikrooptischen Gesamtsystem entstehen können, erfolgen.

Die Abbildungsfehler bzw. Aberrationen eines optischen Systems bewirken eine Abweichung der Strahlen vom idealen Strahlengang. Die Aberrationen lassen sich in zwei

unterschiedliche Hauptgruppen, den monochromatischen und chromatischen Aberrationen, einteilen. Chromatische Aberrationen entstehen durch die Abhängigkeit der Brechkraft von der Wellenlänge des Lichts (Dispersion). Hierzu zählen Farblängsfehler und Farbquerfehler. Durch die Verwendung einer achromatischen Linse kann der Farbfehler korrigiert werden. Die monochromatischen Aberrationen entstehen auch bei einfarbigem Licht. Zu diesen Abbildungsfehlern gehören Astigmatismus, sphärische Aberrationen und Koma, welche das Bild unscharf machen. Des Weiteren zählen die Abbildungsfehler Bildfeldwölbung und Verzeichnung zu dieser Hauptgruppe, welche das Bild verformen. Eine vollständige Korrektur aller Abbildungsfehler eines optischen Systems ist nicht möglich. Jedoch können einzelne Fehler so weit reduziert werden, dass die daraus resultierenden Unschärfen und Verzerrungen des Objektbildes unterhalb der Wahrnehmungsgrenze bleiben. Für eine detaillierte Beschreibung der Abbildungsfehler sei auf [10] verwiesen.

Das adaptive¹ mikrooptische System ermöglicht trotz der kleinen physikalischen Öffnung des Systems eine hochauflösende Abbildung eines ausgedehnten Objektbereichs. Durch die Verstimmbarkeit der Einzelkomponenten können je nach Bedarf das Gesamtbild oder einzelne Ausschnitte detailgenau abgebildet werden. Zusätzlich können Informationen über die dreidimensionale Struktur der Objekte erfasst werden.

Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit soll die abschließende optische Komponente des Gesamtsystems, die verstimmbare piezoelektrische Membran-basierte Mikrolinse, realisiert und demonstriert werden. Dabei sollen neue Materialkombinationen für die adaptive Mikrooptik erforscht und getestet werden. Als neuartiges Materialsystem für verstimmbare Mikrolinsen werden elastische Siliziumnitrid (Si_xN_y)- und nanokristalline Diamant (engl.: *nanocrystalline diamond*, NCD)-Membranen mit piezoaktiven AlN kombiniert. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Mikrolinsenvarianten mit diesen unterschiedlichen Materialkombinationen hergestellt und charakterisiert.

Die erste entwickelte piezoelektrisch aktivierte Mikrolinse besteht aus einer AlN/ Si_xN_y -Heterostruktur und die zweite Variante aus einer Kombination von AlN und NCD. Dies ermöglicht die Vor- und Nachteile der Materialkombinationen herauszuarbeiten. Die Veränderung der Oberflächenkrümmung bei diesen Mikrolinsen wird durch das von Biegebalken bekannte unimorphe Prinzip [11] erreicht (Kapitel 3.3). Dieses neuartige Konzept stellt eine direkte Integration des Aktors in die Linsenmembran dar, wodurch eine kompakte Bauweise des mikrooptischen Systems ermöglicht wird. Folglich werden keine zusätzlichen externen Aktoren benötigt, wie sie in den bisherigen aktiven Mikrolinsen notwendig sind. Durch die integrierte piezoelektrische Aktuierung der Mikrolinse soll eine sehr schnelle Durchstimmung bei kleinen Stellwegen realisiert werden.

Die Realisierung der Topelektroden als unabhängige Sektoren, die getrennt voneinander angesteuert werden können, ermöglicht sowohl eine sphärische als auch eine asphärische Verformung der Linsenoberfläche, um diese Mikrolinsen zur schnellen Feineinstellung des Fokus oder als Wellenfrontkorrektor einsetzen zu können (Abbildung 1.2). Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Vorteile dieser adaptiven mikrooptischen Technologie gegenüber den klassischen Aktorprinzipien zur Verstimmung von Mikrolinsen anhand der piezoelektrisch aktivierte Mikrolinse aufgezeigt und erste Demonstratoren realisiert werden.

¹Die adaptive Optik bezeichnet die Anpassung eines optischen Systems an die Veränderungen in seinem Strahlengang und ermöglicht die Korrektur von Wellenfrontstörungen.

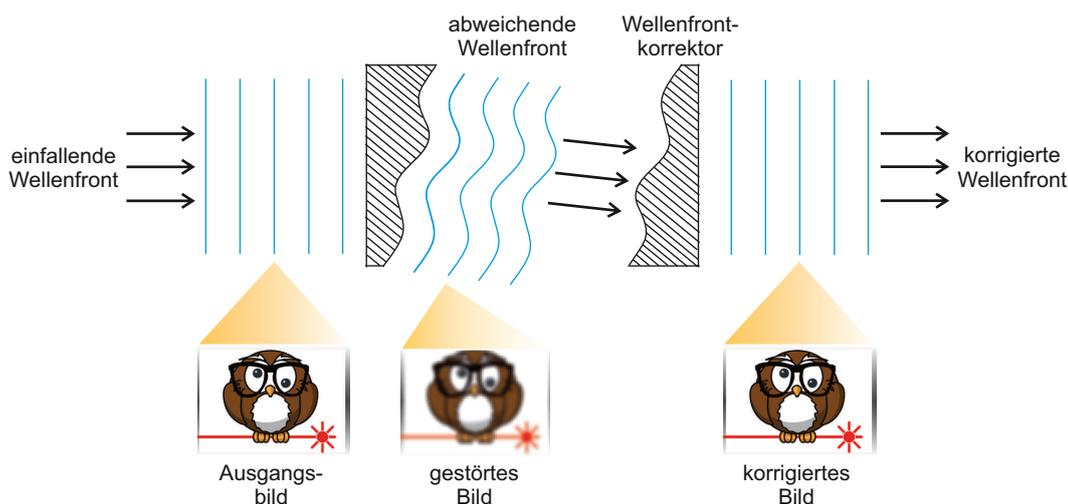


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung der Wellenfrontkorrektur

Zu Beginn wird im nachfolgenden Kapitel 2 ein Überblick über den Stand der Forschung zu aktiven Mikrooptiken aufgezeigt. Dabei werden die Aktorprinzipien zur Verstimmung von Mikrolinsen vorgestellt und deren Vor- und Nachteile diskutiert. Zusätzlich werden die in der Literatur verwendeten wichtigsten Materialsysteme für Mikrolinsen vorgestellt. Das Kapitel 3 widmet sich der Bauelemententwicklung. Hierbei werden in Kapitel 3.1 die Anforderungen an die verstimmbare piezoelektrische Mikrolinse aufgezeigt. Anschließend werden in Kapitel 3.2 die Materialeigenschaften der verwendeten Materialien AlN , Si_xN_y und NCD aus der Literatur und deren Verwendung in Mikro-elektro-mechanischen Systemen (MEMS) beschrieben. In Kapitel 3.3 wird das unimorphe Prinzip vorgestellt, welches für die Funktionalität der Linsen verantwortlich ist. Die Beschreibung des Designs der adaptiven Mikrolinsen befindet sich in Kapitel 3.4. Die Eigenschaften des piezoelektrischen Aluminiumnitrids werden in Kapitel 4 aufgezeigt. Kapitel 5 befasst sich mit der Realisierung des ersten Prototypen, der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse, und Kapitel 6 mit der AlN/NCD -Mikrolinse. Am Anfang jedes Kapitels wird das Design der jeweiligen Mikrolinse vorgestellt und die Eigenschaften der verwendeten Materialien. Anschließend wird die Herstellung der jeweiligen Dünnschichtmembranen sowie deren mechanische und optische Eigenschaften dargestellt. Dabei wird insbesondere die Eignung der Materialsysteme für Membran-basierte Mikrolinsen diskutiert. Im Anschluss daran wird die Herstellung der Bauelemente beschrieben. Um die mechanische und optische Wirkungsweise der Mikrolinsen zu simulieren, wird ein elektro-mechanisches und ein optisches Modell eingeführt. Abschließend wird die reale mechanische und optische Wirkungsweise der zwei Linsentypen untersucht und die Ergebnisse mit den Simulationen verglichen. Kapitel 7 gibt einen Vergleich der zwei verschiedenen Bauelemente und zeigt ihre jeweiligen Vor- und Nachteile auf. Die Arbeit schließt in Kapitel 8 mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und einem kurzen Ausblick.

2 Stand der Forschung

Das erste mikrooptische Forschungsprojekt in der Geschichte ist eng verbunden mit der Entwicklung der Mikroskopie. Im 17. Jahrhundert haben Robert Hooke und Antonie van Leeuwenhoek die Technik zur Herstellung kleiner Glaslinsen durch das Schmelzen von Glasfäden entwickelt, welche die Auflösung ihrer damaligen Mikroskope deutlich verbesserte. Die ersten Forschungsgruppen an Universitäten auf dem Gebiet der Mikrooptik wurden in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts gegründet. Sie entwickelten und realisierten neuartige Technologien zur Herstellung von Mikrooptiken, was zur Gründung kleiner und mittelständischer Mikrooptik-Unternehmen führte [12]. In der Literatur erschien der Name „Mikrooptik“ zum ersten Mal 1984 [13, 14]. Die Kommerzialisierung begann in den 80er Jahren mit dem Einsatz von Mikrooptiken in der Telekommunikation. Heutzutage sind mikrooptische Komponenten und Module in vielen Anwendungen und Produkten existentiell wie z. B. in der Kommunikationstechnik, in Lasersystemen, in der Medizin, in der Halbleiterindustrie und in der Messtechnik. Mikrooptische Bauelemente haben typischerweise Strukturabmessungen im Mikro- und Nanometerbereich. Zu den Bauelementen der Mikrooptik zählen u. a. Linsen, Prismen, Filter, Polarisatoren, Spiegel, Blenden und Gitter. Der Schwerpunkt der Entwicklung liegt dabei in der Realisierung von Linsen und Linsenarrays [14, 15]. Zu den klassischen Herstellungsmethoden mikrooptischer Komponenten zählen u. a. chemische Diffusionsprozesse in Gradienten-Index-Bauelementen, Spritzguss, Prägetechniken, Inkjet-Technik sowie Wafer-basierte Fertigungsprozesse der Halbleitertechnologie [12].

Mikrooptische Systeme können neben den optischen Elementen auch Komponenten der Mikromechanik enthalten. Die Kombination von mikro-elektro-mechanischen Systemen (MEMS) mit mikrooptischen Elementen führte in den 90er Jahren zu einer neuen Klasse von leistungsfähigen Bauelementen, den sogenannten mikro-opto-elektro-mechanischen Systemen (MOEMS) [16].

2.1 Aktive Mikrooptik

Die kontrollierte Änderung der Brennweite, Vergrößerung oder Strahlposition ist für viele (mikro-)optische Anwendungen von großer Bedeutung. In makrooptischen Systemen geschieht diese Änderung durch die klassische mechanische Bewegung einzelner starrer Bauelemente zueinander. Diese Systeme können jedoch nicht einfach verkleinert werden, will man Materialien, Form und optische Funktion beibehalten. Die Lösung hierfür sind neuartige, leistungsfähige, aktive Mikrooptiken, die mindestens eine optische Funktion dynamisch einstellen oder nachregeln können. Durch die effektive, reproduzierbare und präzise Verstimmbarkeit sind diese Linsen nicht nur in speziellen Anwendungen einsetzbar, sondern finden in zahlreichen unterschiedlichen optischen Systemen Verwendung. In diesen aktiven mikrooptischen Systemen können sowohl das Gesamtsystem, einzelne Komponenten oder die benutzten Materialien verstimmbar sein. Für die Herstellung der mikrooptischen Komponenten werden neue Materialien wie dehnbare Membranen, Flüssigkristalle, verformbare Strukturen und ähnliche Techniken entwickelt und eingesetzt. Die Verstimmbarkeit wird

durch die Nutzung physikalischer Effekte wie Grenzflächenspannung, mechanische Verformung, Quellung von Polymeren oder durch die Verwendung elektrischer oder magnetischer Felder erreicht [14]. Ein Forschungsschwerpunkt der Mikrooptik stellt dabei die Entwicklung neuartiger aktiver Mikrolinsen für den Einsatz in miniaturisierten optischen Systemen, z. B. für Handykameras, Endoskope, optische Abtaster oder Mikroskope, dar [17, 18].

Im nächsten Abschnitt folgt ein Literaturüberblick über die wichtigsten Akteurprinzipien zur Verstimmung von Mikrolinsen.

2.2 Akteurprinzipien zur Verstimmung von Mikrolinsen

Verstimmbare Mikrolinsen können prinzipiell in zwei unterschiedliche Gruppen eingeteilt werden (Abbildung 2.1). Einen kleineren Bereich stellen die starren Mikrolinsen dar, deren Verstimmbarkeit durch die Änderung des Brechungsindex in Flüssigkristallen (engl.: *liquid crystal*, LC), durch eine Änderung der Flussrate oder bei Flüssigkeitslinsen durch die Elektrobenetzung sowie durch dielektrische Kräfte erreicht wird. Den größten Bereich stellen jedoch die flexiblen Mikrolinsen dar. Diese bestehen üblicherweise aus einer elastischen Membran, welche zwei Phasen (meist Luft und eine optische Flüssigkeit) voneinander trennt. Die Krümmungsänderung dieser verstimmbaren Mikrolinsen wird typischerweise durch die Volumenänderung der optischen Flüssigkeit oder durch eine Druckänderung eingestellt. Darüber hinaus existieren vereinzelte Mikrolinsen, deren Membran direkt durch eine elektrostatische oder thermische Aktuierung verformt werden kann.

2.2.1 Starre verstimmbare Mikrolinsen

In der Literatur existieren einige Prinzipien zur Verstimmung von starren Mikrolinsen. Im Folgenden werden diese vorgestellt sowie deren Vor- und Nachteile aufgezeigt.

Verstimmbarkeit des Brechungsindex

Die erste Flüssigkristalllinse wurde 1979 von Sato entwickelt [19]. In den folgenden Jahren wurden verschiedene Strukturen und LC-Materialien für die Herstellung verstimmbarer LC-Linsen verwendet [20–28]. Der Durchmesser konventioneller LC-Linsen liegt im Bereich von 0,5 bis 20 mm [14, 21]. LC-Linsen können aufgrund ihrer Bauart in zwei unterschiedliche Gruppen unterteilt werden: LC-Linsen mit paralleler Glasplattenanordnung und LC-Linsen aus einer planaren Glasplatte und einer konkaven Glaslinse.

Der Aufbau einer LC-Linse bei Verwendung einer planaren Glasplatte und einer konkaven Glaslinse ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Beim Anlegen einer Spannung, die größer ist als die Schwellenspannung U_{th} (Abbildung 2.2b), richten sich die Flüssigkristalle parallel zur optischen Achse aus und die totale Brennweite der Linse f wird verändert [19, 21] gemäß

$$f = \left[\frac{1}{f_{LC}(U)} + \frac{1}{f_g} \right]^{-1} = \frac{R}{n_{eff}(U) - n_g}. \quad (2.1)$$

Dabei ist R der Krümmungsradius der konkaven Glaslinse, f_{LC} die Brennweite der Flüssigkristalle mit $f_{LC} = \frac{R}{n_{eff}(U) - 1}$, n_{eff} der effektive Brechungsindex für das durchquerende Licht und f_g die Brennweite und n_g der Brechungsindex der konkaven Glaslinse.

Der Aufbau einer Flüssigkristalllinse mit einer parallelen Anordnung der Glasplatten ist in Abbildung 2.3 illustriert. Wenn keine Spannung anliegt, ist die Brennweite unendlich,

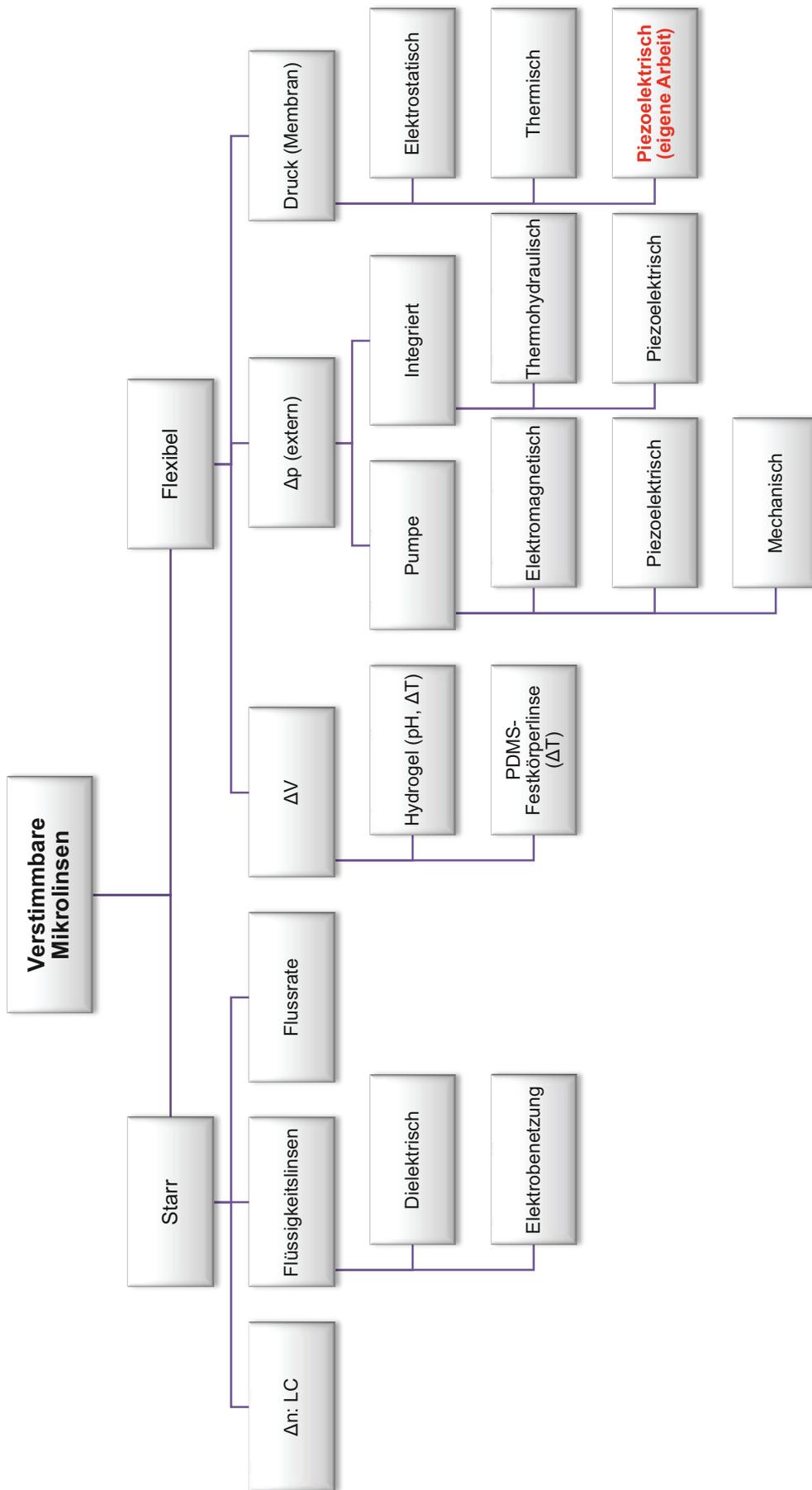


Abbildung 2.1: Übersicht über verstimmbare Mikrolinsen. Hierbei steht Δn für eine Änderung des Brechungsindex, ΔV für eine Volumenänderung, Δp für eine Änderung des Druckes und ΔT für eine Temperaturänderung.

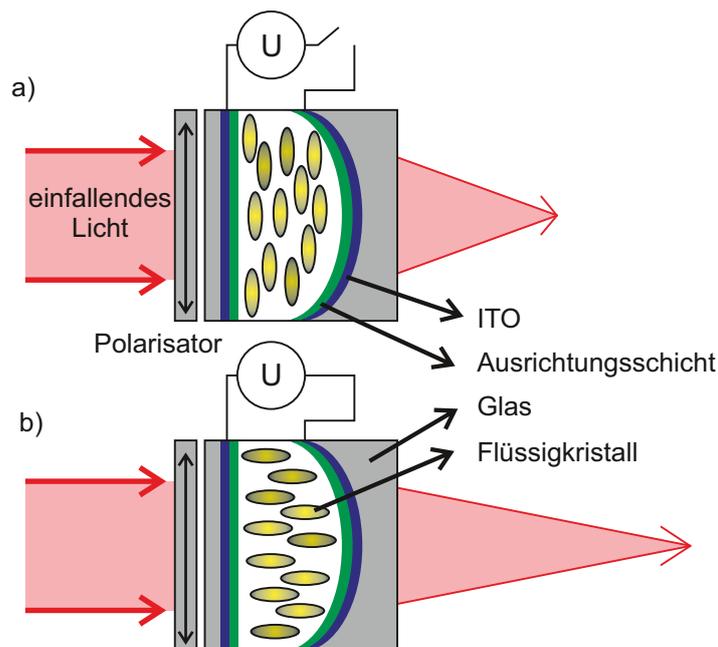


Abbildung 2.2: Funktionsweise und Aufbau einer konventionellen LC-Linse mit einer planaren Glasplatte und einer Glaslinse bei a) Nichtanlegen und b) Anlegen von Spannung [21]

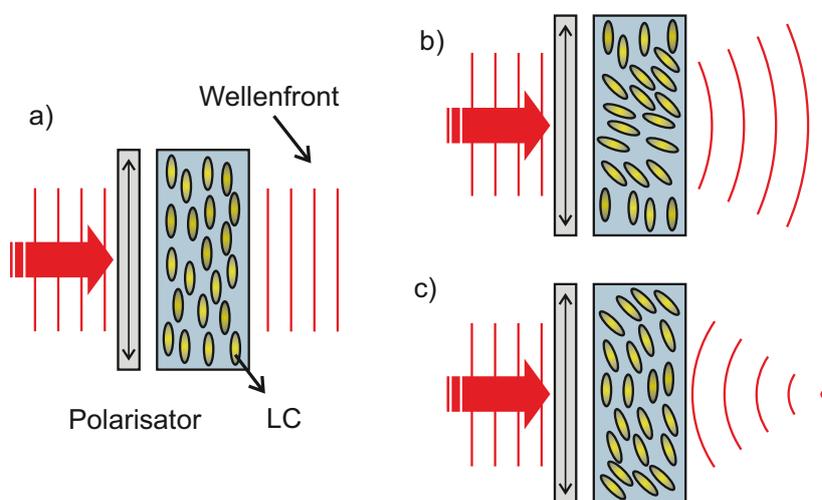


Abbildung 2.3: Funktionsweise und Aufbau einer konventionellen LC-Linse mit paralleler Glasplattenanordnung [21]. a) Bei $U = 0 \text{ V}$ wird die einfallende Welle nicht gebeugt. Durch das Anlegen einer Spannung entsteht durch die Beugung der Wellenfront eine b) Zerstreuung- oder c) Sammellinse.

da sich die Wellenfront des einfallenden Lichtes beim Durchdringen der LC-Linse nicht ändert (Abbildung 2.3a). Beim Anlegen einer Spannung mit $U > U_{th}$ wird die einfallende ebene Welle in eine divergente (Abbildung 2.3b) oder konvergente sphärische Wellenfront (Abbildung 2.3c) gebeugt. Die Flüssigkristalllinse wirkt somit als Zerstreuungs- oder Sammellinse mit einer Brennweite [21, 29]:

$$f = \frac{D^2}{8\Delta n(U)d_{LC}}. \quad (2.2)$$

$\Delta n (n_e - n_o)$ stellt hierbei den Brechungsindexunterschied, D die Öffnungsweite und d_{LC} den Zellabstand der Flüssigkristalllinse dar.

Die Vorteile der LC-Linsen sind die Verwendung niedriger Anregungsspannungen (≤ 10 V) und die relativ kurzen Reaktionszeiten (≈ 500 ms) [21, 30]. Die entscheidenden Nachteile dieser Technik sind, dass Aberrationen aufgrund von Inhomogenitäten im elektrischen Feld auftreten können und dass polarisiertes Licht benötigt wird. Die Flüssigkristalllinsen können deshalb nur in Spezialanwendungen eingesetzt werden [14].

Flüssigkeitslinsen basierend auf Elektrobenetzung

Die erste Flüssigkeitslinse basierend auf dem physikalischen Prinzip der Elektrobenetzung [31, 32] wurde 1995 von Gorman et al. entwickelt [33]. Das Benetzungsverhalten eines Flüssigkeitstropfens auf einer meist planaren Oberfläche kann dabei kontrolliert manipuliert werden. Typischerweise wird ein elektrisch leitender oder zumindest polarer Flüssigkeitstropfen auf eine dielektrische Schicht aufgebracht, welche sich auf einer Elektrode befindet. In den meisten Anwendungen ist der Tropfen eine wässrige Salzlösung mit einem Durchmesser von 1 mm oder kleiner. Umgeben ist der Tropfen entweder von Luft oder einer hydrophoben Flüssigkeit (z. B. Öl) [17]. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung wird der Kontaktwinkel des Tropfens, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, verändert.

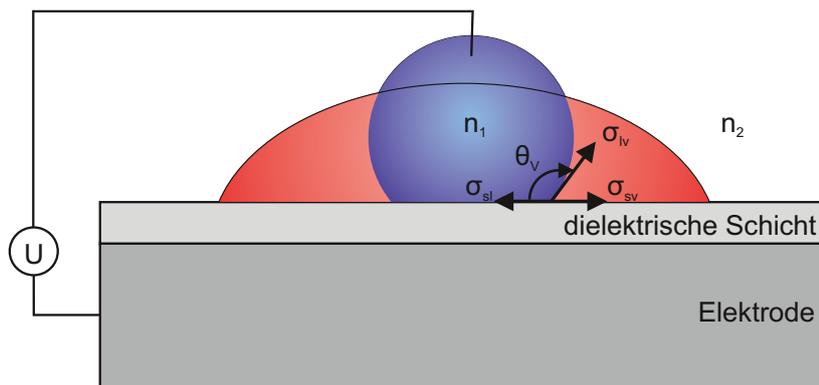


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Prinzips der Elektrobenetzung. Ein Flüssigkeitstropfen ist durch eine isolierende dielektrische Schicht von einer Elektrode getrennt. Die Oberflächenspannung σ und somit die Form des Tropfens lässt sich durch das Anlegen von elektrischer Spannung kontrolliert verändern.

Die spannungsabhängige Änderung des Kontaktwinkels wird mit der Lippmann-Gleichung beschrieben [34]:

$$\cos(\Theta_V) = \cos(\Theta_0) + \frac{\epsilon}{2d_{di}\sigma_{lv}}U^2. \quad (2.3)$$

Dabei sind Θ_0 und Θ_V die Kontaktwinkel vor und nach dem Anlegen der Spannung, ϵ die Permittivität und d_{di} die Dicke des Dielektrikums. σ_{lv} gibt die Oberflächenspannung der Flüssigkeit und U die angelegte Spannung an. Durch die Manipulation des Flüssigkeitstropfens kann die Brennweite des optischen Systems eingestellt werden [35]

$$f = \frac{D}{2\Delta n \sin\Theta}. \quad (2.4)$$

D ist hierbei die Öffnungsweite, Θ der spannungsabhängige Kontaktwinkel und Δn der Brechungsindexunterschied zwischen dem Tropfen und der Umgebung ($n_1 - n_2$).

In der Literatur existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Konzepten zur Herstellung von Flüssigkeitslinsen basierend auf dem Elektrobenetzungs-Prinzip [34, 36–38]. Die ersten kommerziellen Flüssigkeitslinsen sind bei Philips und Varioptic S.A., mit einem ähnlichen Aufbau, bereits erhältlich [39, 40]. Die Struktur der Flüssigkeitslinse von Philips ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

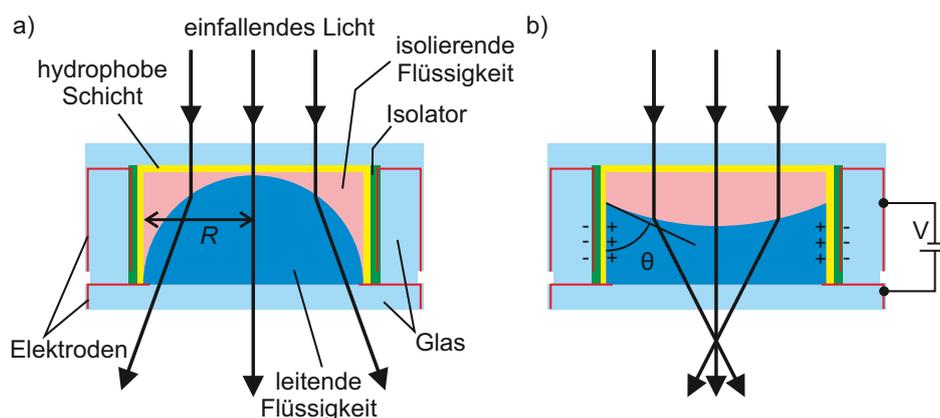


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung einer Flüssigkeitslinse basierend auf dem Elektrobenetzungs-Prinzip [39]. Bei $U = 0$ V ist die leitende Flüssigkeit sphärisch. b) Bei $U > 0$ V verringert sich der Kontaktwinkel zwischen der leitenden und isolierenden Flüssigkeit und es entsteht eine negative Linse.

Zwei nicht mischbare Flüssigkeiten befinden sich in einem zylinderförmigen Gehäuse. Eine der Flüssigkeiten ist elektrisch leitend (z. B. wässrige Salzlösung) und die andere isolierend (z. B. Öl). Da beide Flüssigkeiten unterschiedliche Brechungsindizes ($n_1 \neq n_2$), aber dieselbe Dichte haben, ist die Form des Meniskus perfekt sphärisch (Abbildung 2.5a). Die Zellwände sind mit einer transparenten Elektrode, einer isolierenden und einer hydrophoben Schicht bedeckt. Bei angelegter Spannung sammeln sich die Ladungen an der Zellwand-Elektrode und an der fest/flüssig-Grenzfläche in der leitenden Flüssigkeit. Dadurch verringert sich der Kontaktwinkel Θ und es entsteht eine plankonkave Linse (Abbildung 2.5b). Die Brennweite dieser Linse kann bei Spannungen im Bereich von 0 - 120 V zwischen -10 und +20 mm variieren.

Flüssigkeitslinsen, basierend auf der Elektrobenetzung, können auch auf flexiblen Substraten hergestellt werden [37]. Durch das Anlegen von Spannungen im Bereich von 0 - 125 V kann eine Brennweite zwischen -15 und +28 mm mit einer Reaktionszeit von ≈ 50 ms

eingestellt werden. Diese Flüssigkeitslinsen können aufgrund ihrer Flexibilität z. B. auf einer kommerziellen Kontaktlinse aufgebracht werden [37].

Die Vorteile der Flüssigkeitslinsen, basierend auf der Elektrobenetzung, sind die kurzen Reaktionszeiten (< 100 ms) und der geringe Stromverbrauch aufgrund der elektrostatischen Aktuierung [36, 37]. Die entscheidenden Nachteile dieser Technik sind, dass die Linsen mit sehr hohen Anregungsspannungen - z. T. über 100 V - betrieben werden müssen, die Herstellung relativ kompliziert ist und die Flüssigkeiten verdunsten können [17, 30]. Weiterhin können Leistungseinbußen durch Flüssigkeitsrückstände aus der Produktion oder Kondenswasser auf den Feststoffoberflächen entstehen [18].

Dielektrisch aktuierte Mikrolinsen

Im Gegensatz zu der Elektrobenetzung werden in dielektrophoretischen Systemen zwei nicht mischbare, nichtleitende Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten verwendet (z. B. Acrylatmonomere und deionisiertes Wasser). In inhomogenen elektrischen Feldern können Flüssigkeitstropfen parallel oder antiparallel polarisiert und dadurch bewegt werden. Dabei bestimmen die dielektrischen Eigenschaften des Tropfens und des umgebenden Mediums die Stärke und Richtung der Polarisation [14, 41, 42]. Vereinzelt Mikrolinsen, basierend auf diesem Prinzip, wurden in den letzten Jahren vorgestellt [43, 44].

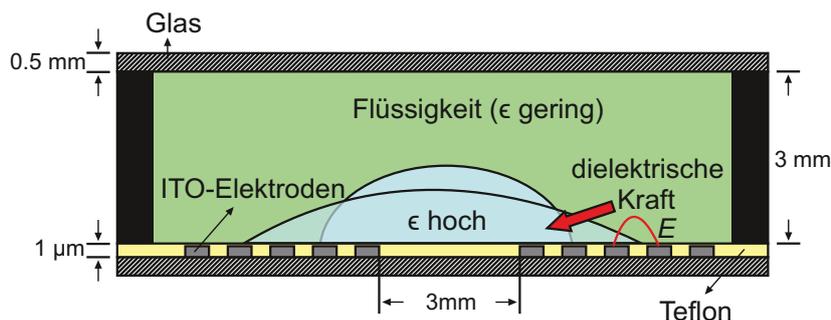


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung einer dielektrischen Flüssigkeitslinse [43]. Die Oberfläche und damit die Brennweite der Linse kann durch eine dielektrische Kraft verändert werden. Dabei steht ϵ für die Dielektrizitätskonstante der Flüssigkeiten.

Cheng et al. präsentierten die erste Flüssigkeitslinse, die durch eine dielektrische Kraft aktuiert wird [43]. Abbildung 2.6 zeigt den Aufbau einer dielektrisch aktuierten Mikrolinse. Sie besteht aus einem Flüssigkeitstropfen mit niedriger Dielektrizitätskonstante und hohem Brechungsindex. Die umgebende Flüssigkeit besitzt eine hohe Dielektrizitätskonstante und einen niedrigen Brechungsindex. Die beiden Flüssigkeiten befinden sich in einer Polymethylmethacrylat (PMMA)-Kammer, die durch zwei Glasplatten verschlossen wird. Auf dem unteren Glassubstrat befinden sich Indiumzinnoxid (ITO)-Elektroden zur Ansteuerung der Linse. Beim Anlegen einer Spannung wirkt aufgrund der unterschiedlichen dielektrischen Konstanten der beiden Flüssigkeiten eine dielektrische Kraft auf den Tropfen. Der Flüssigkeitstropfen ändert seine Form und es kommt zu einer Erhöhung des Kontaktwinkels zwischen Flüssigkeitstropfen und Glas. Dementsprechend verringert sich die Brennweite der Linse nach [44, 45]

$$f = \frac{3V}{\pi(1 - \cos\Theta)(2 - \cos^2\Theta - \cos\Theta)(n_1 - n_2)^3}. \quad (2.5)$$

Hierbei sind V das Volumen des Flüssigkeitstropfens, Θ der Kontaktwinkel und n_1 und n_2 die Brechungsindizes des Flüssigkeitstropfens und des umgebenden Mediums. Durch das Anlegen einer Spannung im Bereich von 0 V bis 200 V kann mit einer Reaktionszeit zwischen 350 ms und 650 ms die Brennweite der Linse von 34 mm bis 12 mm variiert werden [43].

Der Vorteil dieser Linsen sind die verhältnismäßig kurzen Reaktionszeiten. Ähnlich wie bei den Mikrolinsen, basierend auf der Elektrobenetzung, sind jedoch die wesentlichen Nachteile die Verwendung hoher Anregungsspannungen - bis zu 200 V - und der Leistungsabfall aufgrund von Flüssigkeitsrückständen auf der Glasoberfläche [18].

Flussratengesteuerte Mikrolinsen

Ein relativ neues Prinzip ist die flussratengesteuerte Kontrolle optofluidischer Mikrolinsen für *Lab on a Chip*¹-Anwendungen [46–48]. Die Strukturen ähneln denen von Mikromischern, die in der Mikrofluidik zum Vermischen von Flüssigkeiten verwendet werden.

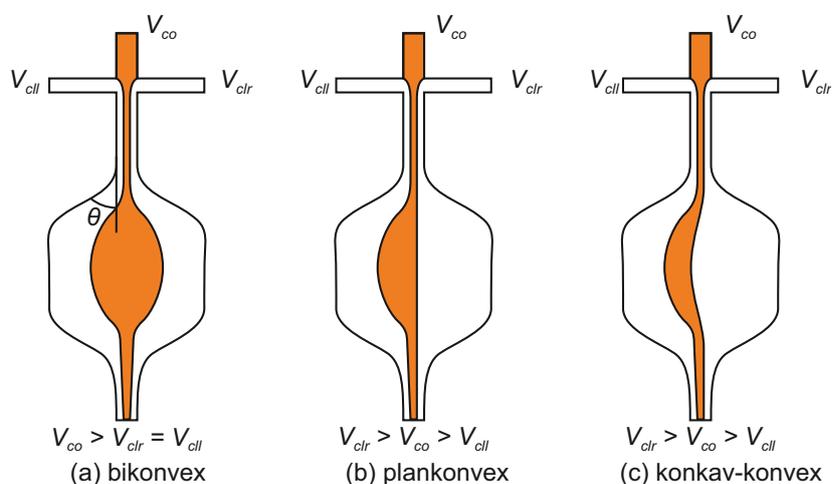


Abbildung 2.7: Darstellung einer flussratengesteuerten Mikrolinse mit drei laminaren Strömungen [46]. Durch die kontrollierte Veränderung der einzelnen Flussraten können a) bikonvexe, b) plankonvexe oder c) konkav-konvexe Linsen hergestellt werden.

Abbildung 2.7 zeigt den Aufbau einer flussratengesteuerten Mikrolinse, die von Seow et al. 2008 vorgestellt wurde [46]. Die Verstimmpbarkeit der Mikrolinse wird durch die Kontrolle der Flussraten von drei Flüssigkeitsströmen erreicht. Der zentrale Flüssigkeitsstrom der Hauptflüssigkeit (z. B. eine Calciumchloridlösung mit $n = 1,46$ oder Benzylalkohol mit $n = 1,54$) hat eine Flussrate von v_{co} . Die anderen beiden umgebenden Flüssigkeiten (z. B. Isopropanol mit $n = 1,33$ oder Methanol mit $n = 1,327$) haben einen niedrigeren Brechungsindex im Vergleich zu der Hauptflüssigkeit und eine Flussrate von v_{cll} (linker Strom) bzw. v_{clr} (rechter Strom). Der Hauptflüssigkeitsstrom wird durch die umschließenden Ströme im Expansionsraum komprimiert und bildet die eigentliche Mikrolinse. Durch die Kontrolle der drei Flussraten können Flüssigkeitslinsen mit unterschiedlichen Krümmungsradien hergestellt werden, was eine Realisierung von bikonvexen, plankonvexen oder konkav-konvexen Linsen ermöglicht. Für eine bikonvexe Linse liegt die Brennweite zwischen $325 \mu\text{m}$ und $293 \mu\text{m}$ und für eine konkav-konvexe Linse zwischen $325 \mu\text{m}$ und $302 \mu\text{m}$ [46].

¹*Lab on a Chip* sind mikrofluidische Systeme mit sehr geringen Reaktionsvolumina, welche auf einer millimetergroßen Plattform integriert sind.

Die Vorteile dieser flussratengesteuerten Mikrolinsen sind, dass nur ein einzelner Polymerchip angefertigt werden muss und dass die Brennweiteinstellung auf der Mikroskala möglich ist. Der entscheidende Nachteil dieses Verfahrens ist die unumgängliche Verwendung von Mikrokanälen und Pumpen, die den Einsatz dieses Systems außerhalb der *Lab on a chip*-Anwendungen deutlich erschweren. Weiterhin kann es aufgrund von Konzentrationsunterschieden zu Diffusionen an den flüssig/flüssig-Grenzflächen kommen.

2.2.2 Flexible verstimbare Mikrolinsen

In den letzten Jahren wurden verschiedene Aktorprinzipien, die eine Krümmungsänderung der flexiblen Linsenoberfläche verursachen, untersucht und deren Anwendungen demonstriert. Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Prinzipien vorgestellt und deren Vor- und Nachteile diskutiert.

Druckgesteuerte Membranlinsen

Den größten Forschungsschwerpunkt innerhalb der aktiven Mikrooptik stellen druckgesteuerte Membranlinsen dar [49]. Diese Linsen bestehen aus einer dünnen, undurchlässigen Membran (gewöhnlich Polydimethylsiloxan, PDMS), welche zwei Phasen voneinander trennt. Die Kammer unterhalb der Membran ist mit einer Flüssigkeit gefüllt, die einen anderen Brechungsindex als das Umgebungsmedium - meist Luft - besitzt. Da die Membran relativ dünn ist (üblicherweise 50 μm oder weniger), ist ihr optischer Effekt vernachlässigbar und die Brechkraft der Linse ist lediglich abhängig vom Druck der Flüssigkeit in der Kammer [14, 17]. Dieser wird von einer externen Pumpe über Mikrokanäle eingestellt [17]. Diese Technik ermöglicht die Herstellung verschiedener Linsentypen und Linsenarrays [49–56]. Anwendungen finden die druckgesteuerten Mikrolinsen u. a. in der optischen Kohärenztomographie [57].

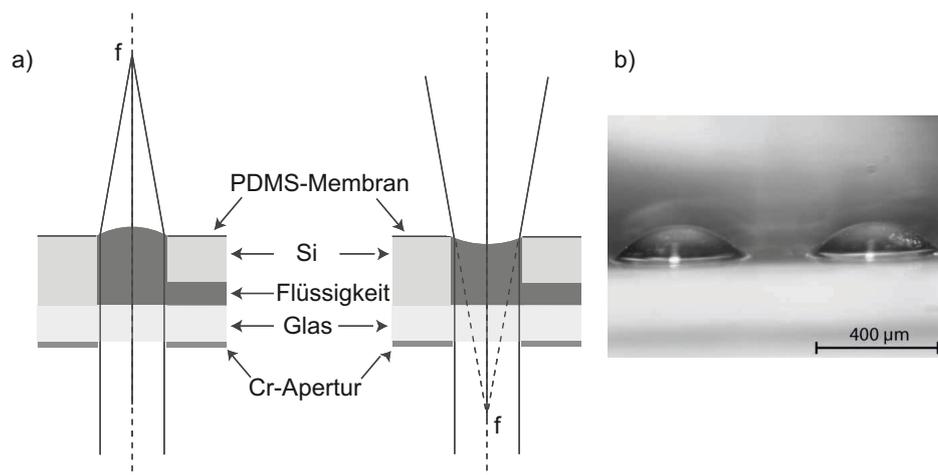


Abbildung 2.8: a) Schematischer Querschnitt durch eine Membran-basierte Mikrolinse [49]. Die pneumatisch gesteuerte Linse kann abhängig vom angelegten Druck eine plankonvexe (b) oder eine plankonkave Form einnehmen.

Abbildung 2.8a zeigt den Aufbau einer typischen druckgesteuerten Membranlinse. Durch die Änderung des Kammerdrucks kann eine plankonvexe oder plankonkave Linse mit einer Brennweite gemäß Gleichung 2.6 hergestellt werden [49]:

$$f = \frac{R}{n_1 - 1}. \quad (2.6)$$

Hierbei ist R der Krümmungsradius und n_1 der Brechungsindex der Flüssigkeit. Mit dieser Membranlinse kann eine Brennweite von 1 mm bis 18 mm (55 kPa) erreicht werden [49]. Ein Mikrophoto dieser Linse ist in Abbildung 2.8b dargestellt.

In den letzten Jahren wurden neben den plankonkaven und plankonvexen druckbetriebenen Membranlinsen auch bikonvexe und bikonkave Linsen entwickelt, die zwei flexible Polymermembranen aufweisen [52, 53, 55]. Der schematische Aufbau einer typischen hydraulisch aktuierten Mikrolinse mit zwei PDMS-Membranen, die sich am oberen und unteren Ende einer Flüssigkeitskammer befinden, ist in Abbildung 2.9 dargestellt.

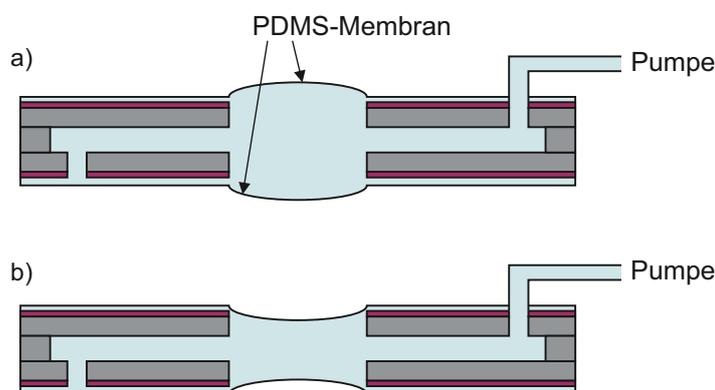


Abbildung 2.9: Schematischer Aufbau einer a) bikonvexen und b) bikonkaven druckgesteuerten PDMS-Membranlinse [52]

Der Durchmesser der Linsen liegt zwischen 0,5 mm und 4 mm. Wird der Kammerdruck durch eine externe Pumpe geändert, können bikonvexe und bikonkave Linsen entstehen. Die damit erreichbaren Brennweiten liegen für die bikonkave Mikrolinse im Bereich zwischen 76 mm und 3 mm und für die bikonvexe Linse zwischen -76 mm und -3,3 mm [52].

Der Vorteil der druckgesteuerten Membranlinsen ist die einfache und kostengünstige Herstellung. Der wesentliche Nachteil dieser Technik ist der notwendige Einsatz von externen Pumpen und die teilweise unkontrollierte asphärische Verformung der Grenzfläche. Die externen Pumpen beschränken maßgeblich die Kompaktheit der Linsensysteme und machen die Integration in andere optische Systeme nahezu unmöglich [30].

Elektromagnetisch aktuierte Flüssigkeitslinsen

Eine weitere Möglichkeit zur Verstimmung der Mikrolinsen stellt die elektromagnetische Aktuierung dar [58–63]. Die ersten kommerziellen elektromagnetisch aktuierten Mikrolinsen sind bei Optotune AG erhältlich. Im Folgenden soll das Prinzip von Lee et al. exemplarisch vorgestellt werden [59], um die elektromagnetische Aktuierung anschaulich zu präsentieren.

Abbildung 2.10a zeigt den schematischen Aufbau einer Flüssigkeitslinse mit einem eingebauten elektromagnetischen Aktor. Die obere PMMA-Struktur beinhaltet eine Kammer, die die eigentliche PDMS-Linsenmembran mit einer Apertur von 2 mm und ein Loch für den optischen Pfad. Die untere PMMA-Kammer ist ebenfalls eine Flüssigkeitskammer, die eine Fassung für die Installation des Aktors (Magnet und Spule) und Kanäle für eine Luftkühlung

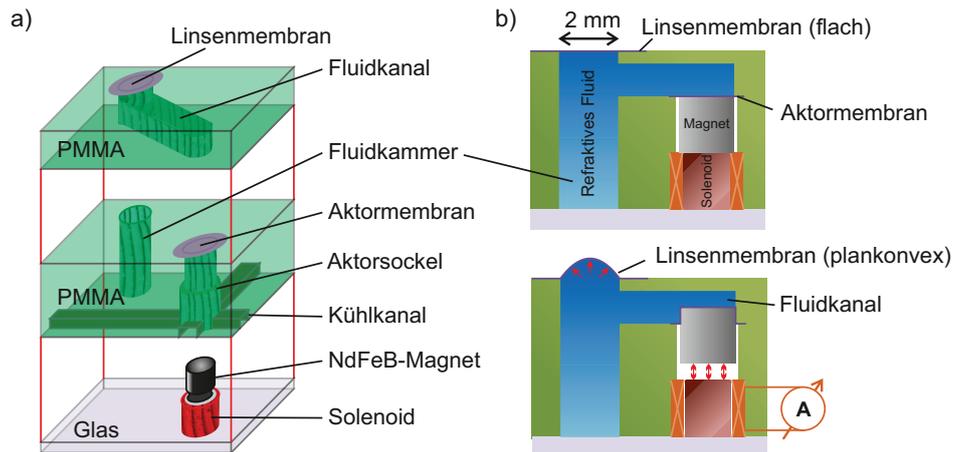


Abbildung 2.10: Darstellung a) der elektromagnetisch aktuierten Mikrolinse und b) des Funktionsmechanismus [59]

der Spule enthält. Die Flüssigkeitskammern und -kanäle sind mit deionisiertem Wasser mit $n = 1,33$ gefüllt. Der Aktor besteht aus einer elastischen PDMS-Aktormembran, einem zylindrischen Neodym-Eisen-Bor (NdFeB)-Permanentmagneten und einer Spule, welche bei Anlegen eines elektrischen Signals eine mechanische Rückstellkraft induziert. Die durch elektromagnetische Induktion erzeugte Rückstellkraft verursacht eine kontinuierliche Verformung der Aktormembran (Abbildung 2.10b). Die Druckbelastung p_a auf die Aktormembran in Abhängigkeit von ihrer Auslenkung z_a ist gegeben durch [58, 64]

$$p_a = \frac{\mu}{4\pi^2 R^2} \left(\frac{m_1 m_2}{d_m} \right) = \frac{E d_M}{3R^4} \left(\frac{7 - \nu}{1 - \nu} \right) z_a^3. \quad (2.7)$$

Dabei sind m_1 und m_2 die magnetischen Momente, d_m der Abstand zwischen den Momenten, μ die Permeabilität der Spule, E das Elastizitätsmodul der Membran, d_M die Membrandicke, R der Krümmungsradius und ν die Poissonzahl. Durch die kontrollierte Verformung der Aktormembran ändert sich der Druck in der Flüssigkeitskammer und die Linsenmembran verändert ihre Form und somit die Brennweite der Linse. Mit dieser Linse kann die Brennweite mit einer Reaktionszeit von 2 ms zwischen ∞ und 15 mm eingestellt werden [59].

Der Vorteil der elektromagnetisch aktuierten Mikrolinsen ist die relativ kurze Reaktionszeit von bis zu 2 ms. Der entscheidende Nachteil dieser Technik ist der Einsatz von Permanentmagneten. Weiterhin kann es durch die Verwendung von hohen Strömen zur Erhitzung der Spule und somit zur thermischen Expansion des Fluids kommen, wodurch die Brennweite der Linse ebenfalls unkontrolliert beeinträchtigt werden kann.

Thermisch aktuierte Mikrolinsen

Die thermische Aktuierung von verstimmbaren Membranlinsen erlaubt eine kompakte Bauweise und Flexibilität. In der Literatur sind verschiedene Techniken zur thermischen Aktuierung bekannt [18, 65–69]. In diesem Abschnitt sollen einige Beispiele vorgestellt werden.

Einen relativ neuen Forschungsansatz zur Verstimmbarkeit der Mikrolinsen stellt das thermohydraulische Aktorprinzip dar [18, 65]. Bei dieser Technik wird ein thermischer Pumpaktor in eine Membran-basierte Flüssigkeitslinse integriert. Der schematische Aufbau einer solchen Linse ist in Abbildung 2.11 dargestellt [65]. Eine mit Flüssigkeit gefüllte Kavität bildet mit

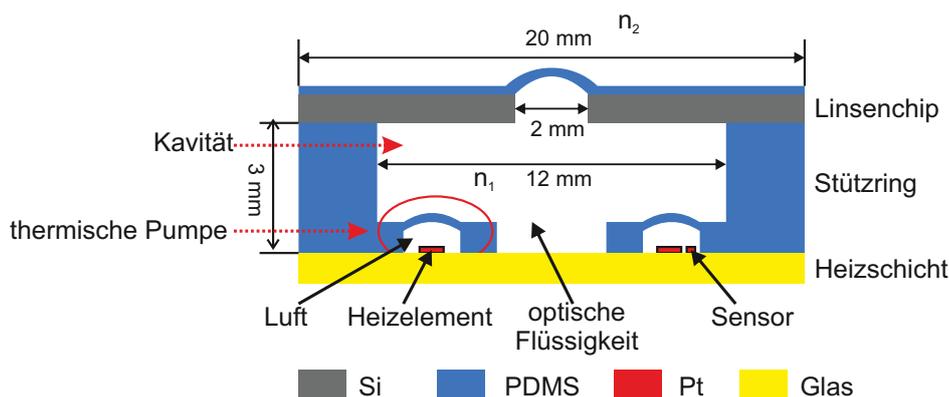


Abbildung 2.11: Schematische Darstellung einer thermopneumatisch aktuierten Mikrolinse [65]

einer dünnen dehnbaren PDMS-Membran die verstimmbare Mikrolinse ($n_1 \neq n_2$). In der Kavität befinden sich thermische Pumpen und Temperatursensoren. Die Pumpenkammern sind mit Luft gefüllt und durch flexible Membranen von der Linsenkommer getrennt. Bei thermischer Aktuierung expandiert die Luft und die Membranen über den thermischen Kammern verursachen eine Kompression und Expansion der optischen Flüssigkeit. Diese verändert die Form der Linsenmembran und somit die Brennweite des Systems [65]. Die Volumenänderung aufgrund der Ausdehnung der Flüssigkeit kann mit Gleichung 2.8 beschrieben werden

$$\Delta V = \alpha V \Delta T. \quad (2.8)$$

Dabei ist V das Volumen der Flüssigkeit, ΔT die Änderung der Temperatur und α der thermische Ausdehnungskoeffizient der optischen Flüssigkeit. Durch diese thermopneumatische Aktuierung kann die Brennweite zwischen 3 mm und 15 mm variiert werden bei einer Temperaturerhöhung von 24 °C auf 37 °C [65].

Der Vorteil dieses Prinzips ist die Verwendung von niedrigen Anregungsspannungen ≤ 10 V und die Integration des Aktors in das kompakte System. Die Nachteile dieser Technik sind die langen Reaktionszeiten ≥ 1 s und der Energieverlust der Heizquelle an die Umgebung [18, 65].

Der thermische Aktor kann sich auch innerhalb der optischen Flüssigkeit befinden und diese expandieren und komprimieren [66, 67]. Die erste thermische Flüssigkeitslinse auf diesem Prinzip wurde 2005 von Wang et al. vorgestellt [66].

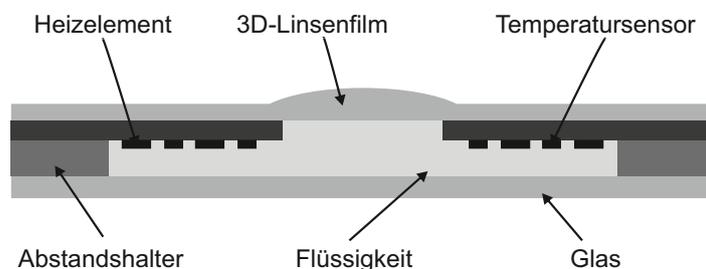


Abbildung 2.12: Darstellung einer thermischen Flüssigkeitslinse [66]

Abbildung 2.12 zeigt den klassischen Aufbau einer solchen Linse. Das System besteht aus einer flexiblen PDMS-Linse und einem Siliziumchip mit Temperatursensor und Aktor.

In der Kammer befindet sich eine dielektrische Flüssigkeit (z. B. Perfluorooctan) mit einem hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Beim Anlegen einer Spannung ändert sich das Volumen des thermischen Fluids in der Kammer und die PDMS-Mikrolinse wird elastisch verformt. Die Brennweite des Systems kann mit Hilfe des Kontaktwinkels Θ , des Krümmungsradius R und der Brechungsindizes n_1 und n_2 der PDMS-Linse und des thermischen Fluids bestimmt werden [66]:

$$f = n_2 \frac{1 + (n_1 - 1) \cos \Theta}{n_1 (n_1 - 1)} R. \quad (2.9)$$

Mit dieser Technik lassen sich Brennweiten von ca. 9,2 mm bis 2,6 mm erreichen. Die Reaktionszeiten dieser Linsen liegen im Bereich zwischen 83 s und 150 s beim Aufheizen bzw. Abkühlen der Flüssigkeit.

Durch die thermische Aktuierung eines optischen Fluids lassen sich große Membranauslenkungen realisieren unter Verwendung von relativ niedrigen Spannungen ($U \leq 20$ V). Die direkte Unterbringung des Heizers in der Linsenkommer stellt neben der langen Reaktionszeit den entscheidenden Nachteil dar. Durch die langen Reaktionszeiten entstehen beim Heizen der Flüssigkeit ein thermischer Gradient und Konvektionsströme im optischen Fluid. Der daraus resultierende inhomogene Brechungsindex der Flüssigkeit kann die optische Leistung der Linse stark beeinträchtigen [30].

Neben den thermisch aktuierten Flüssigkeitslinsen existieren auch vereinzelte thermische PDMS-Festkörperlinsen [68,69]. PDMS dient dabei nicht als phasenseparierendes Membranmaterial, sondern bildet selbst das eigentliche optische Medium, da es einen relativ großen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha = 3.1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ besitzt. Das Prinzip dieser Linsen beruht auf der thermischen Ausdehnung des Polymers, welche den Krümmungsradius der Linsenoberfläche verändert. Der Aufbau einer solchen PDMS-Festkörperlinse ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

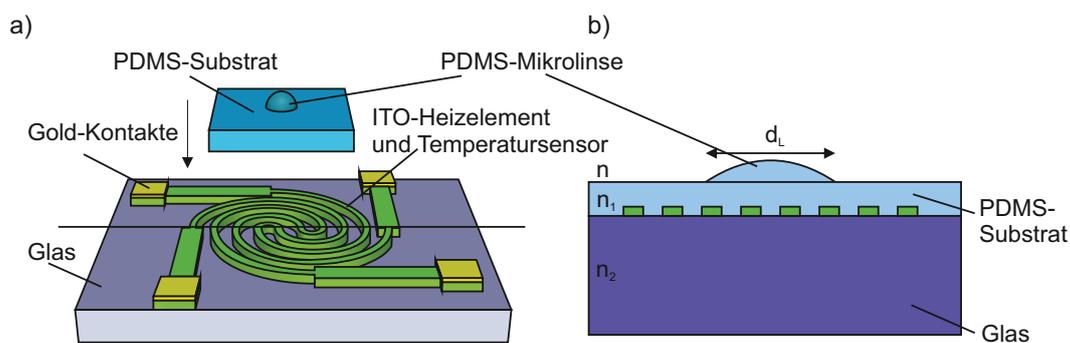


Abbildung 2.13: a) Schematische Darstellung und b) Querschnitt einer plankonvexen PDMS-Linse [68]. Die PDMS-Mikrolinse wird durch ITO-Heizstrukturen thermisch aktuiert.

Das Bauelement besteht aus spiralförmig angeordneten transparenten ITO-Heizstrukturen. Auf den Heizstrukturen befindet sich eine PDMS-Schicht und darüber die eigentliche PDMS-Linse mit einem Durchmesser d_L von 100 μm bis 300 μm . Beim Anlegen einer Spannung an die ITO-Heizstrukturen ändert sich die Dicke der PDMS-Schicht und dementsprechend das Oberflächenprofil der PDMS-Linse. Die Brennweite der Mikrolinse kann somit thermisch kontrolliert werden. Bei Erhöhung der Temperatur von 23 $^{\circ}\text{C}$ auf 42 $^{\circ}\text{C}$ kann die Brennweite um ca. 4 - 6 % variiert werden [68].

Die Vorteile der thermischen Polymerlinsen sind die Robustheit des Systems und dass kein Pumpsystem wie bei den Flüssigkeitslinsen notwendig ist. Die Festkörperlinsen sind widerstandsfähiger gegenüber Temperaturschwankungen, Druck und Bewegung [70]. Um eine Volumenexpansion des Polymeres und damit eine große Änderung der Linsenoberfläche zu erzielen, sind teilweise hohe Temperaturen bis 350 °C, eine hohe elektrische Leistung und lange Reaktionszeiten nötig [30, 69].

Einen neuen Ansatz zur Verstimmbarkeit von Mikrolinsen stellen thermomechanische Linsen dar [71]. Diese bestehen aus Dünnschichtmembranen aus Aluminiumnitrid (AlN) mit integrierten Platin-Heizstrukturen auf Silizium(Si)-substraten (Abbildung 2.14).

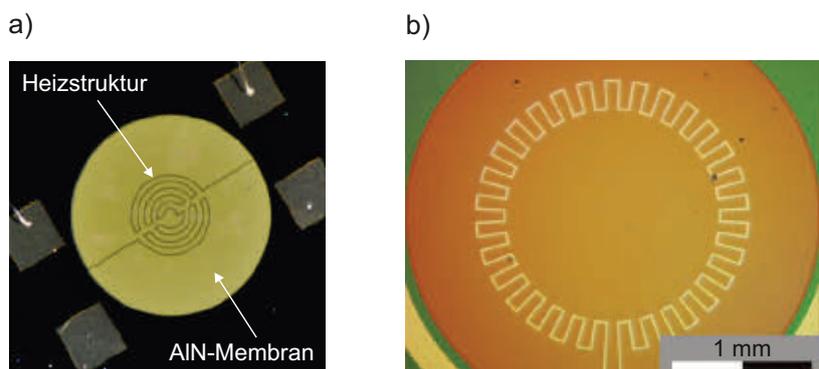


Abbildung 2.14: Fotos einer 500 nm dicken AlN-Membran mit einem Durchmesser von 3 mm mit zwei unterschiedlichen Heizstrukturen [71, 72]

Die elektrische Kontaktierung erfolgt hierbei mittels Kontaktpads. Die Mikrolinse wird mit Immersionsöl befüllt und die AlN-Membran mithilfe der integrierten Heizleiter geheizt. Die temperaturabhängige Dehnung von AlN α_{AlN} ist gegeben durch [73]

$$\alpha_{AlN} = \alpha_{Si} - \frac{1 - \nu_{AlN}}{E_{AlN}} \frac{d\sigma_{AlN}}{d\Delta T}. \quad (2.10)$$

Hierbei ist α_{Si} der thermische Ausdehnungskoeffizient von Silizium, E_{AlN} der Elastizitätsmodul (E-Modul) von AlN, ν_{AlN} die Poissonzahl sowie $d\sigma_{AlN}/d\Delta T$ die temperaturabhängige mechanische Spannung der AlN-Schicht. Beim Anlegen einer Spannung an die Heizleiter dehnt sich die AlN-Membran aus. Dadurch kann die Membranauslenkung gesteigert werden und somit die Brechkraft der Linse. Mit dieser Mikrolinse konnte bei einer Erhöhung der Temperatur von 20 °C auf 200 °C die Brennweite um ca. 20 % variiert werden [72].

Der Vorteil der thermomechanischen Mikrolinsen ist die Integration der Heizstrukturen in die Linsenmembran und somit die kompakte Bauweise der Bauelemente. Die Nachteile dieser Technik sind die thermisch induzierte Deformation der Membranoberfläche sowie die Erwärmung des Füllmediums, was zu einer Brechungsindexverteilung führt. Vor allem die schlechten Reaktionszeiten verhindern eine kommerzielle Nutzung thermisch aktiver Mikrolinsen.

Aktuierung durch funktionale Hydrogele

Flüssigkeitslinsen können auch durch funktionale Hydrogele² aktuieret werden. Dieser Forschungsansatz hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen [17]. Hydrogele können durch eine Vielzahl von Anregungsmechanismen funktionalisiert werden [74]. Verschiedene funktionale Hydrogele wie Temperatur- [75, 76], pH-Wert- [75, 77] oder IR-sensitive Hydrogele [78–80] wurden bereits in verstimmbaren Mikrolinsen eingesetzt und charakterisiert. Der grundsätzliche Aufbau dieser Linsen ist dabei relativ ähnlich. Typischerweise bildet ein Meniskus aus Wasser und Öl die eigentliche Linse. Durch die Änderung der Krümmung des Meniskus kann die Brennweite der Mikrolinse eingestellt werden [75].

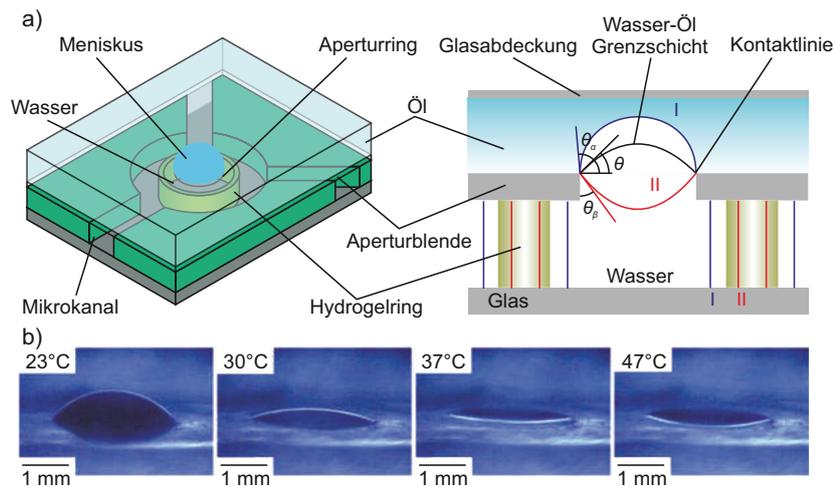


Abbildung 2.15: a) Aufbau und Funktionsmechanismus einer Hydrogel-basierten Mikrolinse [75]. b) Durch die Variation der Temperatur können sowohl divergente als auch konvergente Linsen gebildet werden.

Abbildung 2.15a zeigt den schematischen Aufbau und den Funktionsmechanismus einer verstimmbaren Hydrogellinse nach Dong et al. [75]. Das Bauelement besteht aus einem funktionalen Hydrogelring, der sich in einem wassergefüllten System aus Mikrokanälen befindet. Die Seitenwände und die untere Fläche der Apertur sind durch eine chemische Behandlung hydrophil, wohingegen die obere Fläche der Apertur hydrophob ist. Dadurch bildet sich der Meniskus zwischen dem Öl und dem Wasser entlang der hydrophoben-hydrophilen Grenze, der oberen Kante der Blendenöffnung, aus. Durch die Änderung der Temperatur oder des pH-Wertes kann das Hydrogel aktiviert werden, wodurch der Hydrogelring durch die Abgabe bzw. Aufnahme des Wassers schrumpft (rote gestrichelte Linie, II) bzw. expandiert (blaue gestrichelte Linie, I). Die Aktivierung des Hydrogels führt zu einer Volumenänderung des Wassertropfens und somit zu einer Änderung des Krümmungsradius bzw. der Brennweite der Linse.

Als Temperatur-sensitives Hydrogel kann z. B. Poly-N-Isopropylacrylamid verwendet werden [75]. Unterhalb der unteren kritischen Lösungstemperatur von 32 °C kann das Hydrogel auf ein Zehnfaches seines Volumens aufquellen. Oberhalb der kritischen Lösungstemperatur schrumpft das Hydrogel und gibt sein eingelagertes Wasser an die Umgebung ab [75, 76, 81].

²Hydrogele bestehen aus hydrophilen, unlöslichen, dreidimensional vernetzten Polymeren, die in Wasser aufquellen. Die Eigenschaften der Hydrogele können z. B. durch die Vernetzungsdichte oder die Art der Vernetzung gezielt eingestellt werden.

Bei einer Variation der Temperatur von 23 °C bis 47 °C kann die Brennweite zwischen $-\infty$ bis $-11,7$ mm und $+22,8$ mm bis ∞ innerhalb von 20 - 25 s eingestellt werden.

Die Vorteile dieser Technik sind die akzeptablen Einstellmöglichkeiten der Brennweite. Die größte Schwäche des Systems stellen allerdings die langen Reaktionszeiten ≥ 5 s bei allen Anregungsmechanismen dar. Dadurch sind diese Mikrolinsen nicht für schnell einstellbare mikrooptische Systeme geeignet. Wesentlich schneller sind piezoelektrisch aktuierte Mikrolinsen.

Piezoelektrisch aktuierte Mikrolinsen

Piezoelektrische Aktoren besitzen Reaktionszeiten im ms-Bereich und eignen sich daher hervorragend für schnell einstellbare Mikrolinsen [82]. Verschiedene Möglichkeiten zur Kombination eines piezoelektrischen Aktors mit einer Flüssigkeitslinse wurden in den letzten Jahren demonstriert [83–87]. Zwei unterschiedliche Forschungsansätze sollen im Folgenden vorgestellt werden.

Oku et al. präsentierten 2009 eine Flüssigkeitslinse, die aus zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten mit $n_2 > n_1$ mit nahezu identischer Dichte bestehen [84]. Dadurch kann der Gravitationseffekt, der bei Flüssigkeiten mit unterschiedlichen Dichten die Grenzfläche deformieren würde, vernachlässigt werden. Der Prototyp dieser Linse und der schematische Aufbau sind in Abbildung 2.16 dargestellt.

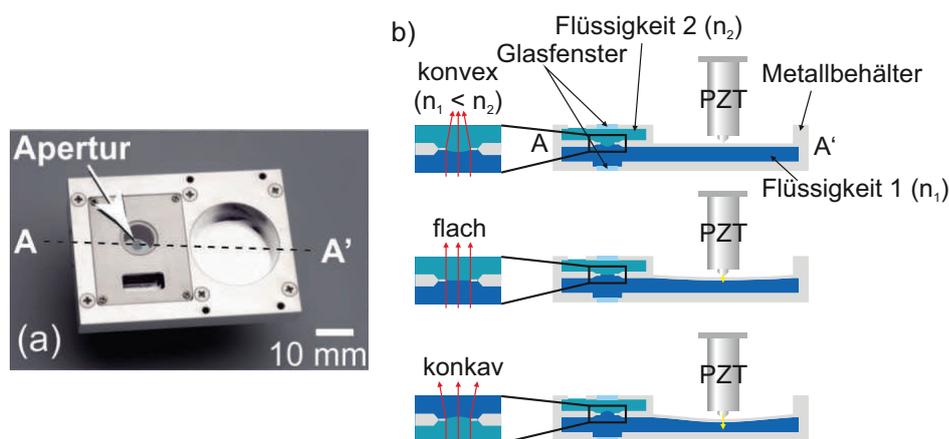


Abbildung 2.16: a) Foto eines Prototyps und b) Funktionsmechanismus einer piezoelektrisch aktuierten Mikrolinse [84]

Die Flüssigkeiten befinden sich in zwei unterschiedlichen Kammern und sind nur in der Mitte durch ein kreisrundes Loch, der Apertur, miteinander verbunden. Die Grenzfläche wirkt aufgrund der unterschiedlichen Brechungsindizes der beiden Fluide als brechende Oberfläche. Die untere Kammer besteht aus einer deformierbaren Wand, die durch die Ausdehnung eines externen Blei-Zirkonat-Titanat (PZT)-Piezoaktors durchgedrückt werden kann. Ist der Piezoaktor nicht aktiviert, nimmt die Mikrolinse eine konvexe Form an. Wird der Piezoaktor aktiviert, verringert sich das Volumen der Kammer 1 und die Flüssigkeit 1 wird nach oben gegen die Grenzfläche gedrückt. Dadurch ändert sich die Form der Linse von konvex zu konkav (Abbildung 2.16b). Der Piezoaktor kann mit einer maximalen Frequenz von 10 kHz betrieben werden. Der Stellweg von ≈ 10 μm ist jedoch zu kurz, um eine signifikante Änderung der Brechkraft zu erzielen. Durch den Einbau eines Verstärkers lassen

sich die Stellwege deutlich vergrößern. Mit diesem Aufbau kann die Brennweite zwischen ∞ und 79 mm mit einer Linsenansprechzeit von 2 ms variiert werden [84].

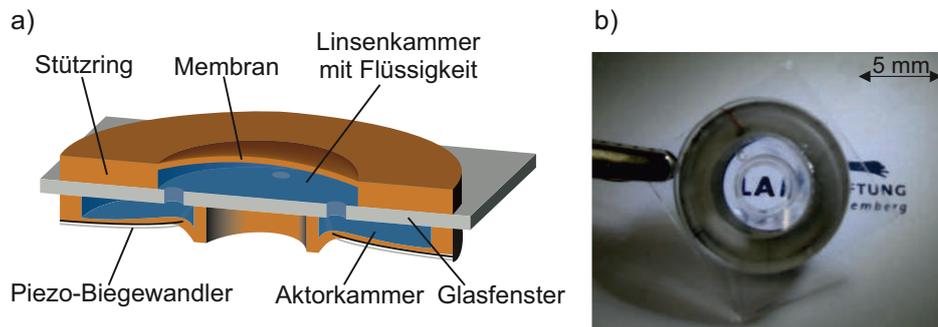


Abbildung 2.17: a) Schematische Darstellung einer Flüssigkeitslinse mit einem integrierten Piezoaktor und b) Foto des Linsensystems [85]

2009 präsentierten Schneider et al. die erste PDMS-Membranflüssigkeitslinse mit einem integrierten piezoelektrischen Pumpaktor [85]. Durch die Aktorspannung kann die Brennweite der Linse eingestellt werden. Abbildung 2.17 zeigt den schematischen Aufbau (Abbildung 2.17a) und ein Foto (Abbildung 2.17b) der piezoelektrisch aktuierten Membranflüssigkeitslinse mit einer Apertur von 2,5 mm. Das System besteht aus zwei Komponenten, der Linsen- und der Pumpkammer. Die beiden Kammern sind durch ein dünnes Glassubstrat getrennt, jedoch durch kleine Öffnungen miteinander verbunden. Die Linsen-kammer besteht aus einer PDMS-Membran mit einem Stützring und ist mit einer Flüssigkeit gefüllt. Die Pumpkammer enthält einen eingebetteten piezoelektrischen Biegewandler. Der Flüssigkeitsaustausch der beiden Kammern erfolgt durch die kleinen Öffnungen im Glassubstrat. Beim Anlegen einer negativen Spannung an den Piezo-Biegewandler wird dieser nach oben ausgelenkt und die Flüssigkeit wird aus der Pumpkammer in die Linsen-kammer verdrängt. Folglich erhöht sich die Auslenkung der Membran und die Brennweite der Flüssigkeitslinse wird verringert. In einem Spannungsbereich zwischen -9 V und +44 V variiert die Brennweite zwischen 30 mm und 500 mm [85].

Piezoelektrisch aktuierte Flüssigkeitslinsen werden bei Spannungen ≤ 45 V betrieben und besitzen extrem kurze Reaktionszeiten im ms-Bereich, die mit keinem anderen Aktorprinzip erreicht werden können. Die Verwendung externer Piezoaktoren limitiert allerdings die Strukturabmessungen der Bauelemente. Durch die Integration der Piezoaktoren kann dieses Problem gelöst werden.

Elektrostatisch aktuierte Flüssigkeitslinsen

In der Literatur sind nur einige wenige Mikrolinsen bekannt, die elektrostatisch aktuiert werden [88, 89].

Bink-Khiem et al. stellten 2008 die erste elektrostatisch aktuierte Mikrolinse unter Verwendung eines Parylenfilms her [88]. Abbildung 2.18a zeigt den schematischen Aufbau einer solchen Linse mit einem typischen Durchmesser von 1-3 mm. Der Flüssigkeitstropfen befindet sich auf einem mit ITO-Strukturen beschichteten Glassubstrat. Auf die Flüssigkeit wurde ein Parylenfilm mittels chemischer Gasphasenabscheidung (CVD, engl.: *chemical vapor deposition*) aufgebracht. Dieser ist elastisch und bestimmt die Form des Tropfens. Auf dem Parylenfilm befindet sich eine dünne Goldschicht, die als obere Elektrode dient. Am

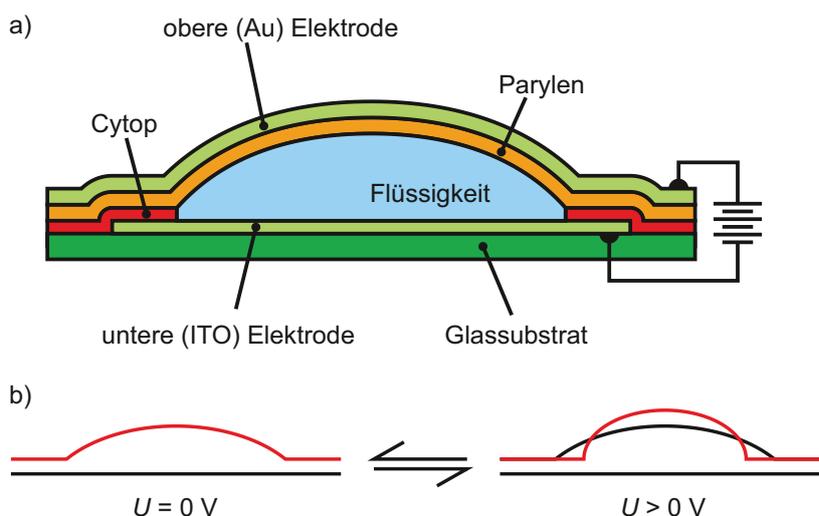


Abbildung 2.18: Schematische Darstellung der a) Struktur und b) Deformation einer elektrostatisk aktuierten Mikrolinse [88]

Rand des Glaswafers wurde eine Cytop³-Schicht aufgebracht. Diese ist flüssigkeitsabweisend - im Gegensatz zu dem Glassubstrat - und zwingt somit die Flüssigkeit in die gewünschte Tropfenform. Beim Anlegen einer Spannung ziehen sich die ITO- und die Gold-Elektrode aufgrund elektrostatischer Kräfte gegenseitig an. Da im äußeren kreisförmigen Bereich der Linse der Abstand der beiden Elektroden geringer ist, sind dort die elektrostatischen Kräfte größer. Die Parylenmembran wird ausgelenkt, da sich beim Anlegen einer Spannung das Volumen der Flüssigkeit nicht ändert. Folglich ändert sich der Krümmungsradius der Linse und somit die Brennweite. Mit dieser elektrostatisk aktuierten Mikrolinse kann die Brennweite mit einer Dynamik von 5 Hz zwischen 3,7 mm und 1 mm eingestellt werden [88].

Die Vorteile dieser Linse sind die akzeptablen Reaktionszeiten und der Verdunstungsschutz der Flüssigkeit durch einen dünnen Parylenfilm. Die totale Transmission der Linse von nur ca. 62 % bei einer Wellenlänge von 650 nm und die hohen Versorgungsspannungen bis 250 V sind große Nachteile dieser Technik.

Alle vorgestellten Aktorprinzipien zur Verstimbarkeit von Mikrolinsen und deren wichtigsten Parameter (Apertur, Verstimbarkeit der Brennweite, Reaktionszeit) sowie Vor- und Nachteile der jeweiligen Technik sind als Überblick in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Alle aufgezeigten Aktorprinzipien ermöglichen ausschließlich die kontrollierte Änderung der Brennweite und eignen sich nicht für die Realisierung von adaptiven Mikrolinsen. Im Rahmen dieser Arbeit sollen adaptive Mikrolinsen entwickelt werden, die neben der Einstellung der Brennweite auch die Korrektur von Abbildungsfehlern ermöglichen. Um dies zu erreichen, muss ein neuartiges Konzept zur Verstimmung von Mikrolinsen entwickelt werden.

³Cytop ist ein kommerzielles amorphes Fluorpolymer der AGC Chemicals, das im sichtbaren Spektralbereich eine Transparenz von über 95 % aufweist.

Tabelle 2.1: Vergleich der verschiedenen Aktorprinzipien für verstimmbare Mikrolinsen. Die ersten vier aufgeführten Aktorprinzipien finden Anwendung in der Klasse der starren Mikrolinsen. Die restlichen Aktorprinzipien werden in flexiblen Mikrolinsen verwendet. Dabei steht D für die Apertur, f_0 für die Anfangsbrennweite, f_{end} für die Brennweite nach maximaler Verstimmung des Systems, t für die Reaktionszeit, U für die Anregungsspannung und n. v. für nicht veröffentlicht.

Aktorprinzip	Aktorintegration	D in mm	f_0 - f_{end} in mm	t in s	Referenz	Vor- und Nachteile
Verstimmbarer Brechungsindex	ja	2 – 20	∞ – 100	bis 0,5	[20 – 28]	+ niedrige Anregungsspannungen $U \leq 10$ V – nur polarisiertes Licht – keine Verstimmbarkeit im mm-Bereich
	ja	3	-10 – +20	n. v.	[39]	+ kurze Reaktionszeiten
Elektrobenetzung	ja	4	-15 – +28	0,05	[37]	+ geringer Stromverbrauch
	ja	1,6	∞ – 67	0,03	[40]	– hohe Anregungsspannungen $U \geq 100$ V
	ja	0,3	20 – 2,3	0,15	[34]	– komplizierte Herstellung
	ja	2,5	18 – 9	0,3	[36]	– Verdunstung der Fluide
	ja	3	34 – 12	0,3 – 0,65	[43]	+ kurze Reaktionszeiten
Dielektrisch	ja	0,19	2,1 – 1,4	0,03 – 0,25	[44]	– hohe Anregungsspannungen $U \leq 200$ V
	nein	0,4	0,325 – 0,293	n. v.	[46]	+ einfache Herstellung
Flussratengesteuert	nein	0,3	12 – 6	n. v.	[48]	– Einsatz von Mikrokanälen und externen Pumpen
	nein	0,4	18 – 1	n. v.	[49]	– Diffusion an flüssig/flüssig-Grenzflächen
Druckgesteuert	nein	0,5 – 4	-76 – -3,3	n. v.	[52]	
	nein	20	76 – 3	n. v.	[50]	+ einfache und kostengünstige Herstellung
	nein	20	41 – 172	n. v.	[51]	– Einsatz von externen Pumpen
	nein	1	$-\infty$ – -6,3	n. v.	[53]	– unkontrollierte asphärische Verformung der Grenzfläche
	nein	0,2	∞ – 14,3	n. v.	[54]	– Integration in andere optische Systeme nahezu unmöglich
	nein	2	250 – 35	0,02 – 0,045	[55]	
	nein	5	2 – 0,5	n. v.	[56]	
	nein	2	7,5 – 2,9	0,002	[59]	+ teilweise niedrige Reaktionszeiten
	nein	3	∞ – 15	n. v.	[58]	– Verwendung von Permanentmagneten
	nein	10	$-\infty$ – -130	1	[61]	– thermische Expansion des Fluids durch Erhitzung der Spule
Elektromagnetisch	ja	3	∞ – 45	0,0025	[62]	
	ja	3	2500 – 80	0,0025	[62]	

Aktorprinzip	Aktorintegration	D in mm	f_0-f_{end} in mm	t in s	Referenz	Vor- und Nachteile
Thermisch	ja	2	15 – 3	10 – 50	[65]	+ niedrige Anregungsspannungen $U \leq 10$ V
	ja	2	∞ – 4	30	[18]	– lange Reaktionszeiten – Energieverlust der Heizquelle
	ja	2	9,2 – 2,6	83 – 150	[66]	+ kompakte Bauweise
	ja	1,9	14,7 – 2,8	51	[67]	– lange Reaktionszeiten – thermischer Gradient im optischen Fluid
Funktionale Hydrogele	ja	0,1 – 0,3	1,4 – 1,3	n. v.	[68]	+ robustes System
	ja	1,5	1,85 – 1	n. v.	[69]	– lange Reaktionszeiten – hohe Temperaturen $T \leq 350$ °C – großer Stromverbrauch
	ja	3	$-\infty$ – -11,7 ∞ – 22,8	20 – 25	[75]	
	ja	2	$-\infty$ – -7,6 ∞ – 8,5	10	[77]	
Piezoelektrisch	ja	2,5 – 3	$-\infty$ – -3,3 ∞ – 10,2	20	[76]	+ Einstellmöglichkeiten der Brennweite – lange Reaktionszeiten
	ja	0,02	0,028 – 0,02	n. v.	[90]	
	ja	1,8	120 – 7	5	[80]	
	ja	2	$-\infty$ – -17,4 ∞ – 8	7	[78]	
	nein	3	∞ – 79	0,002	[84]	+ sehr kurze Reaktionszeiten
	nein	5 – 7	-167 – +129	0,001	[83]	– Verwendung zusätzlicher Verstärker
Elektrostatistisch	nein	7	n. v.	0,0067	[86]	– externe Piezoaktoren
	ja	2,5	500 – 300	n. v.	[85]	+ kostengünstige Herstellung + integrierter Piezoaktor – höhere Anregungsspannung $U \leq 45$ V
	ja	1 – 3	3,7 – 1	0,2	[88]	+ akzeptable Reaktionszeiten + Schutz der Flüssigkeit vor dem Verdampfen
	ja	3	-500 – +250	1	[89]	– geringe Transmission < 65 % – hohe Anregungsspannungen $U \leq 250$ V

2.3 Materialsysteme für verstimmbare Membranlinsen

Nach der Vorstellung der verschiedenen Aktorprinzipien für verstimmbare Mikrolinsen in Kapitel 2.2 sollen in diesem Abschnitt die wichtigsten, in der Literatur verwendeten, Materialien für die Mikrooptik, insbesondere für verstimmbare Membranlinsen, beschrieben werden. Die Materialien für Membran-basierte Mikrolinsen sind sehr beschränkt, da diese im gewünschten Spektralbereich transparent und mechanisch stabil sein müssen [30]. Die meisten verstimmbare Membranlinsen bestehen aus PDMS [49, 52, 59, 65, 85], seltener auch aus Siliziumdioxid (SiO_2) [91] oder Aluminiumnitrid [6, 92, 93].

SiO_2 besitzt einen hohen E-Modul von ≈ 60 GPa [94], weshalb relativ große Kräfte nötig sind, um die Deformation einer μm -dicken Membran zu erreichen. Dieser Grund hat die Verbreitung von SiO_2 als Membranmaterial in der Mikrooptik verhindert.

PDMS ist ein Polymer aus alternierenden Si-O-Einheiten in der Hauptkette mit jeweils zwei Methylgruppen an jedem Siliziumatom [95]. PDMS besitzt eine hohe optische Transparenz von ≥ 92 % im Bereich von 400 bis 1700 nm, einen E-Modul von 4,8 GPa [38] und einen Brechungsindex von 1,415 bei einer Wellenlänge von 532 nm [96]. Darüber hinaus hat PDMS eine geringe Oberflächenrauheit, ist temperaturstabil und kann mit Standard-MEMS-Technologien kombiniert werden [35, 49]. Da die Herstellungskosten von PDMS relativ niedrig sind, eignet sich dieses Material besonders gut für den Einsatz in Membran-basierten Flüssigkeitslinsen. Die PDMS-Membran hat dabei typischerweise eine Schichtdicke von ≈ 50 μm . PDMS ist ein kautschukartiges Material und weist ein Kriechverhalten⁴ auf [97, 98]. Dadurch ändert sich die Brechkraft der Linse bei gleichem Arbeitsdruck [99], was zu einem entscheidenden Nachteil dieses Materials führt.

AIN-Membranen können ebenfalls kostengünstig hergestellt werden und weisen kein Kriechverhalten auf. AIN ist transparent im sichtbaren Spektralbereich, mechanisch stabil und CMOS (engl.: *complementary metal-oxide-semiconductor*)-kompatibel. Durch die hohe mechanische Stabilität des AIN ist es möglich, Membranen mit Schichtdicken von ≤ 1 μm herzustellen [99]. Als optische Flüssigkeit für AIN-Linsen eignet sich z. B. Immersionsöl mit $n = 1,5$.

⁴Das Kriechverhalten bezeichnet die Verformung eines Materials bei konstanter Last.

3 Design der Bauelemente

3.1 Anforderungen an die verstimmbare Mikrolinse

In Kapitel 2 wurde gezeigt, dass die meisten bisher bekannten Mikrolinsen über externe Aktoren betrieben werden, wodurch maßgeblich die Kompaktheit der Bauelemente beschränkt ist und somit die Integration in andere optische Systeme erschwert wird. Die Verstimmbarkeit der Membranlinsen wird bei der Mehrheit durch die Änderung des Druckes eines optischen Fluides realisiert. Dadurch müssen aufwendige Mechanismen zur Steuerung des Druckes in das Bauelement integriert werden. Weiterhin haben die langen Reaktionszeiten zur Ansteuerung der Linse insbesondere bei den thermisch aktuierten Linsen den kommerziellen Erfolg verhindert. Um eine Mikrolinse in ein mikrooptisches Gesamtsystem zur Abbildung von hochauflösenden Bildern zu implementieren, wie in Abbildung 1.1 in Kapitel 1 dargestellt, muss sie folgende Anforderungen erfüllen:

1. Kontrollierte sphärische und asphärische Verformung der Linsenoberfläche für integrierte Fokus- und Wellenfrontkorrektur
2. Integrierte elektrisch angeregte Aktorik
3. Sehr kurze Reaktionszeiten zur Verformung der Linsenoberfläche ≤ 1 ms
4. Verwendung von niedrigen Anregungsspannungen ≤ 20 V
5. Transparenz der Unimorph-Struktur im sichtbaren Spektralbereich
6. Mechanische Stabilität und Flexibilität der Dünnschichtmembranen
7. Kompakte Bauweise und Integrierbarkeit in das mikrooptische Gesamtsystem. Hierfür müssen die Strukturabmessungen des Bauelementes 12×12 mm² betragen

Um sehr kurze Reaktionszeiten zu gewährleisten müssen piezoelektrische Aktoren verwendet werden. Die größte Herausforderung stellt die Realisierung einer hochpräzisen sphärischen und asphärischen Verformung der Linsenoberfläche dar (siehe Anforderung 1). Dafür ist eine äußerste Präzision bei der Bauelementherstellung maßgebend. Durch diese Anforderungen ist die Materialwahl der Schichten für die verstimmbare Mikrolinse stark eingeschränkt.

3.2 Verwendete Materialsysteme und Materialeigenschaften

Im Rahmen dieser Arbeit wird AlN als piezoelektrisches Material eingesetzt, da es die gewünschten Anforderungen erfüllt. Die piezoelektrische AlN-Schicht muss mit einer elastischen Schicht kombiniert werden und kompatibel sein, um eine dünne unimorphe Struktur

(siehe Kapitel 3.3) zu realisieren. Als elastische Schicht eignet sich nanokristalliner Diamant aufgrund seiner exzellenten mechanischen Eigenschaften und hohen Transmission in einem breiten Spektralbereich. Er verleiht der unimorphen Struktur eine große Stabilität. Als kostengünstige Alternative zum nanokristallinen Diamant wird Si_xN_y als elastische Schicht untersucht. In der vorliegenden Arbeit werden zwei verschiedene Materialkombinationen vorgestellt, die als Basis für verstimmbare Membran-basierte Mikrolinsen dienen: $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ und AlN/NCD . In Tabelle 3.1 sind einige Materialeigenschaften von AlN , Si_xN_y und NCD zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Literaturangaben einiger Materialeigenschaften von AlN , Si_xN_y , NCD und ITO

Materialeigenschaft	AlN	Si_xN_y	NCD	ITO
Elastizitätsmodul, E in GPa	300 – 392 [100–102]	190 – 330 [103–105]	400 – 1100 ¹ [106]	100 – 118 [107, 108]
Bruchfestigkeit in GPa	0,3 [109]	5,9 [110]	4,1 [111]	1,7 – 2,4 [112]
Härte in kg/mm^2	1200 [113]	1600 – 3500 [114, 115]	8200 [116]	660 [107]
Dielektrizitätskonstante, ϵ	8,5 [117]	7 [118]	5,2 [119]	4 [120]
Dichte bei 300 K, ρ in g/cm^3	3,3 [121]	3,2 [122]	3,5 [123]	6,8 [124]
Poissonzahl, ν	0,24 [125]	0,23 [110]	0,12 [126]	0,35 [127]
Piezoelektrischer Koeffizient, d_{33} in pm/V (Theorie)	6,72 [128]	-	-	-
d_{33} in pm/V (Messung)	4,5 – 5,5 [129–131]	-	-	-
Bandlücke in eV	6,2 [130]	5,1 – 5,3 [132]	5,45 [133]	3,56 – 4,4 [134]
Brechungsindex, n bei 632.8 nm	1,9 – 2,15 [135]	2,02 [136]	2,2 [137]	1,97 [138]
thermischer Ausdehnungskoeffizient, α in K^{-1}	5.3×10^{-6} ($\alpha_{ c}$) 4.2×10^{-6} ($\alpha_{ a}$) [139]	3.4×10^{-6} [140]	1×10^{-6} [141]	8.5×10^{-6} [142]
Durchbruchfeldstärke in MV/cm	4 – 12 [143, 144]	6 – 8 [145]	10 [146]	-

¹abhängig vom sp^3/sp^2 -Anteil

AlN ist hochtemperaturbeständig sowie widerstandsfähig gegenüber chemischen Angriffen. AlN ist ein Halbleiter mit einer direkten Bandlücke von 6,2 eV [147]. Die hohe Transmission im infraroten bis in den ultravioletten Spektralbereich macht es vor allem für optoelektronische Bauelemente wie lichtemittierende Dioden (LED) und Laserdioden besonders attraktiv [148]. Darüber hinaus besitzt AlN im Vergleich zu anderen Piezoelektrika wie z. B. PZT eine deutlich niedrigere Dielektrizitätskonstante und ist deshalb insbesondere für Bauelemente in Hochfrequenzanwendungen (RF-MEMS) geeignet [149]. AlN besitzt einen moderaten piezoelektrischen Koeffizienten von $d_{33} = 4,5 - 5,5$ pm/V, eine hohe Durchbruchfeldstärke von 4 - 12 MV/cm, eine hohe akustische Oberflächenwellengeschwindigkeit von 11400 m/s und ist zudem monolithisch integrierbar [149,150] und mit CMOS-Prozessen kompatibel [129 - 131, 144, 151, 152]. Infolgedessen stellen AlN-Schichten in vielen MEMS-Bauelementen und Nano-elektro-mechanischen Systemen eine bevorzugte Funktionsschicht dar [151, 153].

Si_xN_y -Dünnschichten (10000 bis 10 nm) besitzen gute mechanische und thermische Eigenschaften sowie eine gute chemische Beständigkeit und finden deshalb eine breite Anwendung in Halbleiter- und MEMS-Bauelementen. Si_xN_y ist ein typisches Werkstoffmaterial für Passivierungsschichten in integrierten Schaltkreisen, für Ätzmasken und dielektrische Bauelemente [154].

Diamant besitzt eine Reihe von herausragenden physikalischen Eigenschaften und ist somit für viele industrielle Anwendungen unverzichtbar geworden. Dank seiner außerordentlich hohen Härte wird Diamant als Standardmaterial zur Beschichtung von Bohrern und Sägen verwendet. Zudem ist Diamant resistent gegenüber Säuren und Laugen sowie hohen Temperaturen und Strahlungen. Diamant hat eine breitbandige, hohe optische Transparenz, eine hohe Durchbruchfeldstärke und eine hohe Wärmeleitfähigkeit von > 1800 W/mK - fünfmal so hoch wie Kupfer - bei gleichzeitiger elektrischer Isolation. Diese Eigenschaften machen den Diamanten für den Einsatz in Wärmesenken, in elektronischen Hochleistungsbauelementen und als Beschichtung von Strahlungsfenstern im infraroten Spektralbereich besonders attraktiv. Durch die gezielte Dotierung mit Bor (p-Dotierung) oder Phosphor (n-Dotierung) können die elektrischen Eigenschaften eingestellt werden [155,156]. Diamant weist eine hohe Mobilität der Ladungsträger von > 3000 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ und eine hohe Durchbruchfeldstärke von 10 MV/cm auf [146]. Nanokristalliner Diamant besitzt ähnliche Eigenschaften wie einkristalliner Diamant und wird vorzugsweise in der Optik, in der Biomedizin und Biotechnologie sowie in MEMS-Bauelementen eingesetzt [157]. Durch seine einzigartigen Materialeigenschaften ist NCD Standardmaterialien wie Silizium für den Einsatz in mikro-elektro-mechanischen Systemen deutlich überlegen. Der hohe Elastizitätsmodul und die niedrige Dichte sorgen für eine hohe Schallgeschwindigkeit von 1×10^4 m/s und ermöglichen dadurch die Realisierung von Resonatoren für sehr hohe Frequenzen und mit hoher Güte [158, 159].

Das Mischoxid Indiumzinnoxid $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO) wird für die Herstellung der Membranbasierten Mikrolinsen als transparente Elektrode verwendet. Die Materialeigenschaften von ITO sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Dünne Schichten aus ITO weisen neben einer hohen optischen Transparenz im sichtbaren Spektralbereich eine hohe elektrische Leitfähigkeit auf. ITO besitzt abhängig von den Ladungsträgerdichten eine große optische Bandlücke zwischen 3,56 eV und 4,40 eV [134] und einen Brechungsindex von $n = 1,97$ [138]. Leitfähige Oxide werden als transparentes Elektrodenmaterial für eine Vielzahl von optoelektronischen Bauelementen verwendet. Für Dünnschichten aus ITO wurden Ladungsträgerdichten bis 10^{-21} cm^{-3} und Leitfähigkeiten über 10000 $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ erreicht [160, 161].

AlN/Si_xN_y-Heterostrukturen finden Anwendung u. a. in piezoelektrisch betriebenen Mikrolautsprechern [162–164] oder in akustischen Oberflächenwellen-Filtern [165]. Die Verwendung dieser Materialkombination in aktiven mikrooptischen Komponenten ist bisher nicht bekannt.

Die Kombination von Diamant und piezoaktivem AlN hat in letzter Zeit große Aufmerksamkeit erreicht, besonders für den Einsatz in MEMS [166, 167] sowie in Oberflächenwellen- und Volumenwellenfiltern mit Betriebsfrequenzen im GHz-Bereich [168, 169]. Diese Filter können in Mobiltelefonen oder in Drahtlosnetzwerken eingesetzt werden. Forschungsarbeiten über AlN/Diamant-Heterostrukturen für die Anwendung in optischen Komponenten sind dagegen sehr selten. Miskys et al. entwickelten Leuchtdioden zum Emittieren von ultravioletttem Licht [170]. Durch die Verwendung von einkristallinem Diamant und die daraus resultierenden hohen Produktionskosten sind diese LEDs allerdings nicht für Industrieprodukte geeignet. Forschungsarbeiten auf dem Gebiet von aktiven Mikrooptiken basierend auf unimorphen AlN/Diamant-Strukturen sind bisher nicht bekannt.

3.3 Unimorphes Prinzip

Die in dieser Arbeit untersuchten Membranlinsen haben den Aufbau einer unimorphen Struktur. Diese besteht aus einer piezoelektrisch aktiven und einer passiven elastischen Schicht, die fest miteinander verbunden sind [11, 171]. Im Gegensatz zur bimorphen [172] ist bei der unimorphen Struktur nur eine piezoelektrische Schicht vorhanden. Darüber hinaus existieren Bauformen mit zwei piezoelektrischen und einer passiven Schicht (trimorph) [173] sowie Strukturen mit mehreren dünnen aktiven Schichten (multimorph) [174]. Piezoelektrische Biegeumwandler wurden 1931 zum ersten Mal von Sawyer et al. eingesetzt und gehören damit zu den ersten piezoelektrischen Aktoren [175]. Piezoelektrische Aktoren besitzen eine hohe Positioniergenauigkeit und können große Stellkräfte bei relativ geringem Energieverbrauch erzielen. Sie sind elektronisch regelbar und weisen hohe Stellgeschwindigkeiten auf.

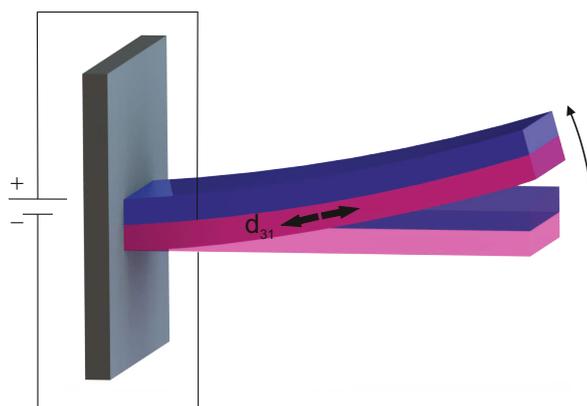


Abbildung 3.1: Darstellung des Funktionsprinzips einer unimorphen Struktur. Der Biegebalken besteht aus einer piezoelektrischen (pink) und einer elastischen Schicht (blau), die fest miteinander verbunden sind. Das Anlegen einer elektrischen Spannung an den Piezokristall führt zu einer Längenänderung der piezoelektrischen Schicht transversal zum angelegten Feld und somit zu einer Auslenkung des Balkens.

In Abbildung 3.1 ist das Funktionsprinzip der unimorphen Struktur anhand eines zweischichtigen Biegebalkens dargestellt. Beim Anlegen eines elektrischen Feldes an den Piezo-

kristall wird eine mechanische Kraft senkrecht zum angelegten Feld induziert. Da die piezoelektrische Schicht fest mit einer elastischen Schicht verbunden ist, verursacht die mechanische Verspannung eine Auslenkung des Biegebalkens. Die Auslenkung δ der unimorphen Struktur ist somit durch die angelegte elektrische Spannung regelbar und ist definiert über

$$\delta = \frac{3l^2}{2d} \frac{2AB(1+B)^2}{A^2B^4 + 2A(2B + 3B^2 + 2B^3) + 1} d_{31} E_3, \quad (3.1)$$

mit l der Länge und d der Gesamtdicke des Biegebalkens, d_{31} dem piezoelektrischen Transversalkoeffizienten und E_3 dem angelegten elektrischen Feld. A ist hierbei das Verhältnis der Elastizitätsmodulen E_e/E_p und B das Dickenverhältnis $d_e/2d_p$, wobei e die elastische und p die piezoelektrische Schicht bezeichnen [171]. Eine optimale Auslenkung des Biegebalkens mit konstanter Schichtdicke und Schichtdickenverhältnis zwischen aktiver und passiver Schicht wird durch die Verwendung eines elastischen Materials mit einem hohen Elastizitätsmodul erreicht.

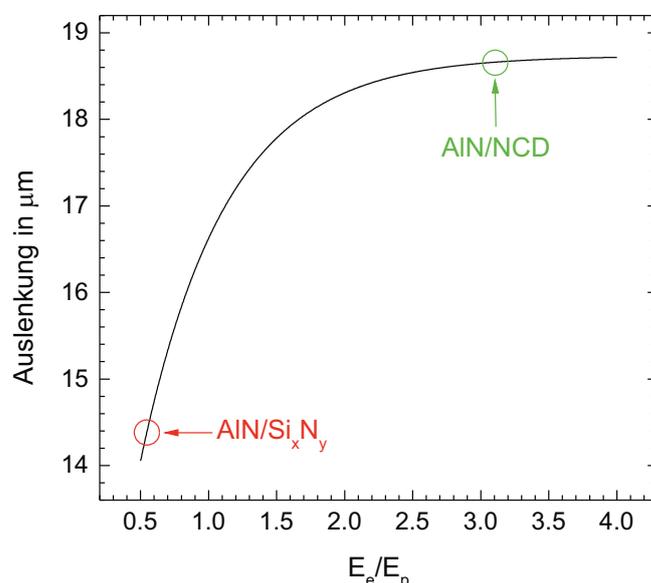


Abbildung 3.2: Auslenkung δ eines unimorphen Biegebalkens in Abhängigkeit des E-Modul-Verhältnis E_e/E_p

In Abbildung 3.2 ist die Auslenkung einer unimorphen Struktur in Abhängigkeit von E_e/E_p dargestellt mit $B = 0,5$, $l = 1 \text{ mm}$, $d = 1 \mu\text{m}$, $d_{31} = 2,5 \text{ pm/V}$ und $E_3 = 10 \text{ V}/\mu\text{m}$. Beim Vergleich der unimorphen AIN/Si_xN_y- mit der unimorphen AIN/NCD-Struktur lässt sich feststellen, dass das E-Modul-Verhältnis der AIN/NCD-Heterostruktur aufgrund des hohen E-Moduls von NCD deutlich größer ist im Vergleich zur AIN/Si_xN_y-Schicht. Aus diesem Grund ist bei der Materialkombination von NCD und AIN eine größere Auslenkung der verstimmbaren Mikrolinse zu erwarten. Für eine detaillierte Beschreibung des unimorphen Prinzips sei auf [176] verwiesen.

3.4 Design der adaptiven Mikrolinsen

In der vorliegenden Arbeit werden unimorphe runde Membranen bestehend aus einer aktiven AlN-Schicht und einer passiven elastischen Si_xN_y - oder NCD-Schicht verwendet, die den Kern der adaptiven Linse bilden. Gemäß den Anforderungen in Kapitel 3.1 muss die Linsenoberfläche sowohl sphärisch als auch asphärisch verformbar sein und der piezoelektrische Aktor in die Linse integrierbar sein. Diese Anforderungen stellen eine große Herausforderung an das Design der Mikrolinse dar. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges Linsendesign entwickelt, das diesen Anforderungen gerecht wird. Das Neuartige am Design der Membran-basierten Mikrolinse ist ein radialer Aktor, der in vier unabhängige Segmente unterteilt ist. Abbildung 3.3 zeigt den schematischen Aufbau der verstimmbaren Mikrolinse.

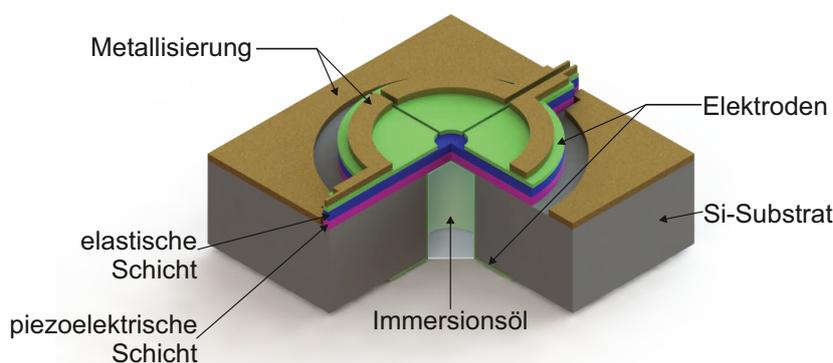


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau der verstimmbaren Mikrolinse. Die Linse besteht aus einer unimorphen Membran sowie einer unteren und einer oberen Elektrode zur Ansteuerung der piezoelektrischen Schicht. Die Kammer unter der Membran wird mit Immersionsöl gefüllt. Die obere Elektrode ist in vier unabhängige Segmente unterteilt für eine präzise steuerbare sphärische und asphärische Verformung der Linsenoberfläche. Die piezoelektrische Schicht ist hierbei in pink, die elastische in blau und die Elektroden in grün dargestellt.

Die Basis der Linse bildet ein 500 μm dicker, p-dotierter Si-Chip. Auf diesem Substrat wird eine dünne piezoelektrische und elastische Schicht abgeschieden. Zur Ansteuerung des piezoelektrischen Aktors werden eine untere und eine obere Elektrode benötigt. Die obere radiale Elektrode ist in vier unabhängige Segmente unterteilt, die getrennt voneinander angesteuert werden können. Die kreisrunde freistehende Membran, welche die eigentliche Linse bildet, wird durch das Ätzen des Si-Substrates freigelegt. Die Kammer unter der Membran wird vor der Verwendung der Linse mit Immersionsöl gefüllt, um eine sphärische Vorauswölbung der Linse zu erreichen. Durch das Variieren der elektrischen Spannung kann die Linsenkrümmung gezielt verändert werden.

Der Querschnitt durch eine Linsenmembran ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Das neue Design der Mikrolinsen ermöglicht sowohl eine symmetrische (Abbildung 3.4b) als auch eine asymmetrische (Abbildung 3.4c) Verformung der Linsenoberfläche. Eine solche präzise 3D-Kontrolle der Linsenoberfläche ist für optische Komponenten von großem Vorteil, da die verstimmbare Mikrolinse somit als integrierter Wellenfrontfilter oder als Korrektor für Abbildungsfehler fungiert, die in komplexen, aus mehreren Komponenten bestehenden optischen Systemen auftreten können. Eine adaptive Mikrolinse, welche sowohl sphärisch als auch asphärisch verformt werden kann, ist bisher in der Literatur nicht bekannt.

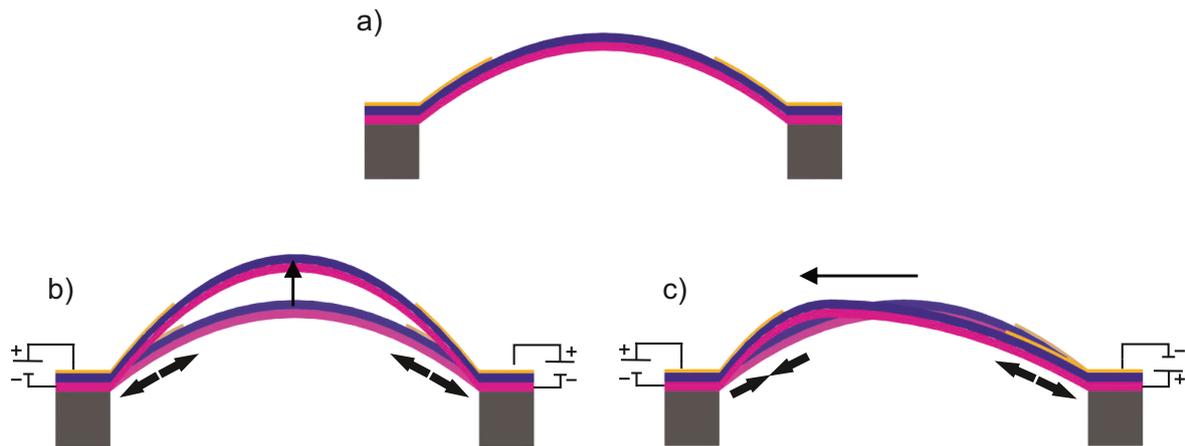


Abbildung 3.4: Querschnitt einer unimorphen Membran a) ohne angelegte Spannung, b) mit gleicher (++) und c) mit unterschiedlicher Spannung (+-). Die piezoelektrische Schicht ist hierbei in pink und die elastische in blau dargestellt. Durch die Variation der elektrischen Spannung kann die Linsenkrümmung aktiv kontrolliert werden.

Darüber hinaus ermöglicht der integrierte piezoelektrische Aktor eine deutlich schnellere und präzisere Verformung der Linsenoberfläche als die Aktorprinzipien in den klassischen Mikrolinsen (siehe Kapitel 2). Das Schichtdickenverhältnis d_p/d_e des piezoelektrischen AlN-Aktors zur elastischen Si_xN_y - bzw. NCD-Schicht und der optimale Bedeckungsgrad der oberen radialen Elektrode für eine maximale Membranauslenkung wurde mit einem numerischen Berechnungsverfahren, der Methode der finiten Elemente (FEM, engl.: *Finite Element Method*), simuliert. Eine maximale Auslenkung der Membranmitte wird bei einem Schichtdickenverhältnis von $d_p/d_e = 0,76 - 0,8$ erreicht. Des Weiteren müssen die äußeren 40 % der Membranoberfläche mit der oberen Elektrode besetzt sein [177]. Für eine detaillierte Beschreibung der FEM-Simulationen zur Bestimmung dieser optimalen Parameter sei auf [178] verwiesen.

In diesem Kapitel wurden die Anforderungen an die verstimmbare Mikrolinse, die verwendeten Materialsysteme und Materialeigenschaften sowie das neuartige Design der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten adaptiven Mikrolinsen vorgestellt. Für die Realisierung dieser verstimmbaren Mikrolinsen wird AlN als aktive Schicht eingesetzt. Aus diesem Grund widmet sich das nächste Kapitel der Herstellung und den Eigenschaften von AlN.

4 Piezoelektrisches AlN

In den verstimmbaren AlN/Si_xN_y- und AlN/NCD-Mikrolinsen stellt die AlN-Schicht den piezoelektrischen Aktor dar, weshalb sich dieses Kapitel zu Beginn mit den Grundlagen der Piezoelektrizität befasst, bevor die Eigenschaften von AlN aufgezeigt werden. Anschließend wird die Herstellung der in dieser Arbeit verwendeten AlN-Dünnschichten und deren piezoelektrischen Eigenschaften vorgestellt.

4.1 Piezoelektrizität

Der piezoelektrische Effekt beschreibt den Zusammenhang zwischen mechanischem Druck und elektrischer Spannung in Festkörpern. Piezoelektrisch aktive Materialien sind Kristalle mit mindestens einer polaren Achse, die kein Symmetriezentrum aufweisen. Hierzu zählen 21 Kristallklassen. Von diesen 21 nicht-zentrosymmetrischen Punktgruppen zeigen 20 Kristallklassen piezoelektrische Eigenschaften mit Ausnahme der Oktaederklasse 432 [179]. Der piezoelektrische Effekt lässt sich in den direkten und den inversen piezoelektrischen Effekt unterteilen. Der direkte piezoelektrische Effekt wurde 1880 von Jaques und Pierre Curie und der inverse piezoelektrische Effekt 1881 von Gabriel Lippmann und Pierre Curie entdeckt [176]. Kristallgitter mit nicht-symmetrischen Einheitszellen besitzen eine spontane Polarisation P_{SP} , welche aufgrund der teilweise unsymmetrischen Anordnung der elektrischen Ladungen im Kristallgitter entsteht. Der Kristall ist im Grundzustand nach außen hin neutral. Bei dem direkten piezoelektrischen Effekt führt eine mechanische Deformation entlang der polaren Achsen zu einer Verschiebung der positiven und negativen Ladungsschwerpunkte und somit zu einer Änderung der elektrischen Polarisation (zusätzlich zur spontanen Polarisation). Diese induzierte Polarisation P_i ist in Tensorform gegeben durch [180]:

$$P_i = d_{ijk} \cdot \sigma_{jk}. \quad (4.1)$$

σ_{jk} stellt hierbei die mechanische Verspannung und d_{ijk} die piezoelektrischen Koeffizienten dar. Durch die Anwendung der Voigt-Notation¹ und aus Symmetriegründen vereinfacht sich die Matrix-Darstellung zu

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}. \quad (4.2)$$

¹Die Voigt-Notation ist eine verkürzte Schreibweise für symmetrische Tensoren. Hierbei werden die Indizes aus der Tensornotation in Paare zusammengefasst und durch Einfachindizes ersetzt.

Die Indizes 1 - 3 beschreiben die Polarisation und die Verspannung entlang der x-, y- und z-Achse und die Indizes 4 - 6 die Scherspannungen um die jeweilige Achse, wie in Abbildung 4.1 dargestellt. Die z-Achse wird als Polarisationsrichtung festgelegt.

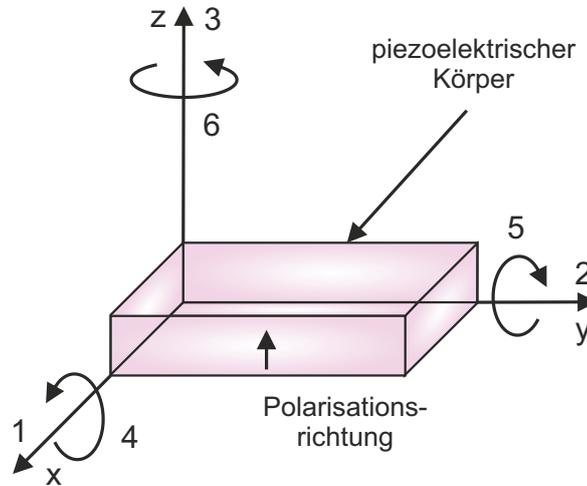


Abbildung 4.1: Definition der Achsenrichtungen

Aluminiumnitrid besitzt eine hexagonale Wurtzitstruktur (siehe Abbildung 4.2), die sich in die Raumgruppe $6mm$ (C_{6V}) einordnen lässt [181]. Aus diesem Grund vereinfacht sich die Darstellung des Tensors unter Berücksichtigung der Symmetrieeigenschaften der Kristalle ($d_{31} = d_{32}$, $d_{33} \neq 0$, $d_{15} = d_{24}$) zu [180, 182]:

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix}. \quad (4.3)$$

Der inverse piezoelektrische Effekt beschreibt dagegen die resultierende mechanische Kontraktion oder Expansion des Piezokristalls bei Anlegen einer elektrischen Spannung. Die mechanische Verspannung ε_{ik} des Kristalls ist dabei gegeben durch den Tensor [180]:

$$\varepsilon_{ik} = d_{ijk} \cdot \sigma_{jk}. \quad (4.4)$$

Diese Tensorform kann ebenfalls aufgrund von Kristallsymmetrien vereinfacht in der Matrix-Schreibweise (Voigt-Notation) dargestellt werden:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}. \quad (4.5)$$

Für hexagonales AlN kann die Zahl der Komponenten, wie im oberen Teil erwähnt, reduziert werden [180, 182]. Daraus ergibt sich Gleichung 4.6:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix}. \quad (4.6)$$

Der piezoelektrische Koeffizient d_{33} beschreibt die Ausdehnung des Kristalls longitudinal zum elektrischen Feld und wird meistens in der Literatur in der Einheit pm/V angegeben. Der piezoelektrische Koeffizient d_{31} hingegen bezeichnet die Ausdehnung des Kristalls transversal zum elektrischen Feld und ist gegeben durch [183]:

$$d_{31} \lesssim -\frac{d_{33}}{2}. \quad (4.7)$$

Für die piezoelektrisch aktuierten Mikrolinsen, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und charakterisiert werden, wird die Ausdehnung des Kristalls transversal zum elektrischen Feld ausgenutzt. Aus messtechnischen Gründen wird in der vorliegenden Arbeit der d_{33} -Koeffizient der piezoelektrischen Materialien angegeben. Weiterreichende Erläuterungen und Ausführungen zur Piezoelektrizität können dem Buch [180] entnommen werden.

4.2 Eigenschaften von Aluminiumnitrid

Aluminiumnitrid zählt zu den Gruppe III-Nitriden und kristallisiert unter Normalbedingungen in der thermodynamisch stabilen hexagonalen Wurtzit-Struktur (α -Phase), wie in Abbildung 4.2 dargestellt. Nur in seltenen Fällen kristallisiert AlN in einer kubischen metastabilen Zinkblende-Struktur (β -Phase) oder Kochsalzstruktur (γ -Phase), die jedoch bislang für MEMS technologisch nicht relevant sind. Deshalb fokussiert sich die folgende Beschreibung auf die hexagonale Phase.

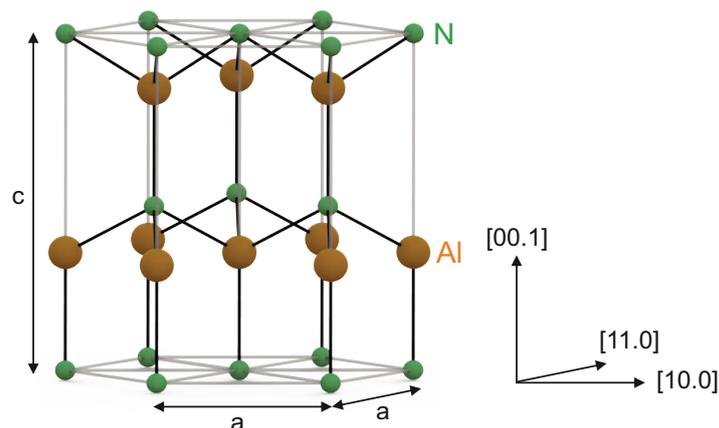


Abbildung 4.2: Schematische Zeichnung der Wurtzit-Struktur des Aluminiumnitrid-Gitters mit den Gitterparametern $a = 3,112 \text{ \AA}$ und $c = 4,982 \text{ \AA}$. Die Aluminiumatome sind in orange, Stickstoffatome in grün dargestellt.

Die Stapelfolge ABABAB besteht wechselweise aus Stickstoff- und Aluminiumlagen, in denen jedes Atom tetraedisch von vier Atomen der anderen Sorte umgeben ist. Jedes

hexagonale Untergitter wird durch die gleich langen Basisvektoren \vec{a}_1 , \vec{a}_2 , \vec{a}_3 ($\angle 120^\circ$) und durch den Basisvektor \vec{c} aufgespannt. Die hexagonale Elementarzelle wird durch die Gitterkonstanten a mit $a = 3,112 \text{ \AA}$ und c mit $c = 4,982 \text{ \AA}$ beschrieben ($c/a = 1,6$) [184]. AlN besitzt eine spontane Polarisation mit $P_{SP}(\text{AlN}) = -0,081 \text{ C/m}^2$ entlang der c -Achse des Kristallgitters. Im Gegensatz zu den ferroelektrischen Materialien tritt die Polarisation ohne äußeres elektrisches Feld auf und ist immer entlang der $[000-1]$ -Richtung ausgerichtet [130].

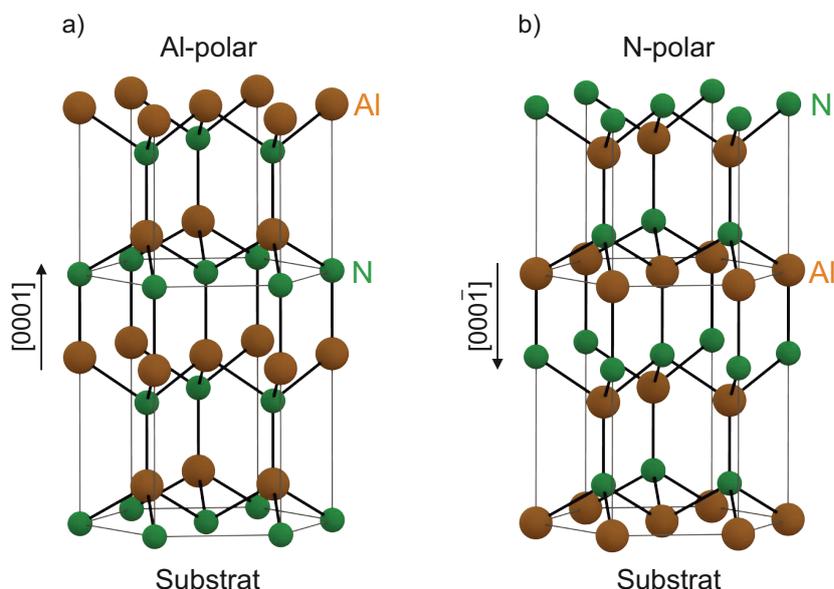


Abbildung 4.3: Anordnung der Aluminium- und Stickstoffatome für a) Al- und b) N-Polarität. Die Stickstoff-Metall-Bindung entlang der c -Achse wird als $[000-1]$ -Richtung festgelegt. Die Aluminiumatome sind in orange, die Stickstoffatome in grün dargestellt.

Die Stickstoff-Metallbindung entlang der c -Achse wird definitionsgemäß als $[000-1]$ -Richtung festgelegt. Aufgrund der polaren Kristallstruktur sind die $[0001]$ - und die $[000-1]$ -Richtung nicht mehr äquivalent [130]. Es kommt zur Ausbildung zweier unterschiedlicher Polaritäten, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, der Aluminium- (Al-polar, engl.: *Al face*) und der Stickstoff-Polarität (N-polar, engl.: *N face*). Die Initialisierung des Schichtwachstums, die verwendete Wachstumsmethode, die Wachstumsparameter und das Substrat selbst entscheiden über die Herstellung von Al- und N-polaren Schichten [130, 185, 186]. Al- oder N-polar bedeutet allerdings nicht, dass die Oberfläche der AlN-Schicht mit Aluminium- oder Stickstoffatomen besetzt ist. Die Polarität ist eine Volumeneigenschaft des Materials und ist unabhängig von der Terminierung der Oberfläche [187]. Al- und N-polares Material unterscheidet sich sowohl in den physikalischen als auch in den chemischen Eigenschaften.

4.3 Herstellung der AlN-Dünnschichten

AlN-Dünnschichten werden seit Beginn der 90er Jahre anhand verschiedener Verfahren hergestellt. Überwiegend werden AlN-Schichten mittels metallorganischer Gasphasenabscheidung [188, 189], Molekularstrahlepitaxie [190], gepulster Laserabscheidung [191] oder durch reaktives Kathodenzerstäuben (Sputtern) [151] auf unterschiedlichen Substraten wie Silizium, Siliziumcarbid oder Saphir abgeschieden. Polykristalline AlN-Dünnschichten für MEMS-

Bauelemente werden hauptsächlich durch das Reaktivsputtern hergestellt, da dieses Verfahren kostengünstig ist und bei Raumtemperatur stattfinden kann und somit eine CMOS-Kompatibilität gewährleistet [192]. Die in dieser Arbeit verwendeten AlN-Dünnschichten wurden mittels reaktiven Magnetronsputterns hergestellt. Die Optimierung der Wachstumsparameter und des Sauerstoffgehalts spielt hierbei eine entscheidende Rolle für die Herstellung von qualitativ hochwertigen Schichten. Die einzelnen Kristallite in der polykristallinen AlN-Schicht müssen alle gleich ausgerichtet sein, um gute piezoelektrische Eigenschaften zu gewährleisten. Solche Vorzugsorientierungen der Kristallite werden mit Textur bezeichnet. Da die Polarität entlang der c-Achse des Kristalls auftritt, ist eine Ausrichtung der c-Achsen der einzelnen Kristallite senkrecht zur Oberfläche wünschenswert [192, 193]. Hochgradig texturiertes polykristallines AlN besitzt dabei ähnlich gute piezoelektrische Eigenschaften wie AlN-Einkristalle [152]. Darüber hinaus ist es wichtig, dass die Kristalle so orientiert sind, dass nur eine Polarität - N- oder Al-Polarität - vorliegt und keine Inversionsdomänen auftreten, die zur Reduzierung des piezoelektrischen Effektes beitragen.

Das Kathodenzerstäuben ist ein vakuumbasiertes Beschichtungsverfahren und zählt zu den Methoden der physikalischen Gasphasenabscheidung. Durch Zugabe eines reaktiven Gases wie Stickstoff (N_2) oder Sauerstoff (O_2) können aus metallischen Targets Nitrid- oder Oxidschichten abgeschieden werden. Dieses Verfahren wird reaktives Sputtern genannt. Beim Magnetronsputtern wird zusätzlich zum elektrischen Feld ein inhomogenes Magnetfeld angelegt. Die Ladungsträger im Plasma werden aufgrund der Lorentzkraft abgelenkt und bewegen sich auf einer spiralförmigen Bahn in Richtung des Targets. Dadurch erhöht sich die Aufenthaltsdauer der Elektronen vor dem Target und somit die Wahrscheinlichkeit zu weiteren Ionisationsstößen. Die erhöhte Anzahl der Ionen ermöglicht einen höheren Abtrag des Targetmaterials und somit eine höhere Sputterrate. Das Magnetronsputtern hat zum wirtschaftlichen Durchbruch des Kathodenzerstäubens geführt [194].

Die Herstellung der AlN-Dünnschichten für diese Arbeit erfolgte an einer kommerziell erhältlichen reaktiven Hochfrequenz-Magnetronsputteranlage CS730S der Firma von Ardenne. In dieser Anlage wird ein Al-Target mit einem Durchmesser von 200 mm und einer Reinheit von 99,999 % verwendet. Zur Herstellung der verstimmbaren AlN/NCD- sowie der AlN/Si_xN_y-Mikrolinsen werden AlN-Dünnschichten mit einer Schichtdicke von 300 nm bzw. 500 nm durch reaktives Sputtern in einer Argon-Stickstoff-Atmosphäre auf einem 500 µm dicken leitfähigem 3" oder 4"-Silizium(100)-Substrat mit einem spezifischen Widerstand von 0,1 - 0,2 Ωcm hergestellt. Vor der Abscheidung wurden die Si-Wafer mit Aceton, Isopropanol und deionisiertem Wasser gereinigt, sowie anschließend für kurze Zeit in Flusssäure getaucht. Die Prozessparameter zur Herstellung von AlN-Dünnschichten sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Die Substrate wurden während des Abscheidvorgangs nicht aktiv geheizt. Aufgrund der Nähe zum Plasma erwärmen sich die Substrate jedoch bis auf 200 - 300 °C. Die Verteilung der AlN-Schichtdicke über den gesamten Wafer wurde mittels Ellipsometrie bestimmt. Die Schichthomogenität von 300 bis 500 nm dünnen AlN-Schichten beträgt ± 4 %. Für die Herstellung der AlN/Si_xN_y- bzw. der AlN/NCD-Mikrolinsen wurden ausschließlich AlN-Dünnschichten mit einer Schichtdicke von 500 nm bzw. 300 nm verwendet, die aufgrund der niedrigen Sputterleistung N-polar sind [186, 195].

Tabelle 4.1: Standard-Prozessparameter für die Herstellung von AlN-Dünnschichten. Dabei steht RT für Raumtemperatur.

Parameter	Wert
Frequenz in MHz	13,56
Target-Substratabstand in mm	59
Leistung in W	600
Basisdruck in mbar	$< 10^{-7}$
Prozessdruck in mbar	6×10^{-3}
Argon-Fluss in sccm	80
Stickstoff-Fluss in sccm	11
Wachstumsrate in nm/min	6
Wachstumstemperatur	RT

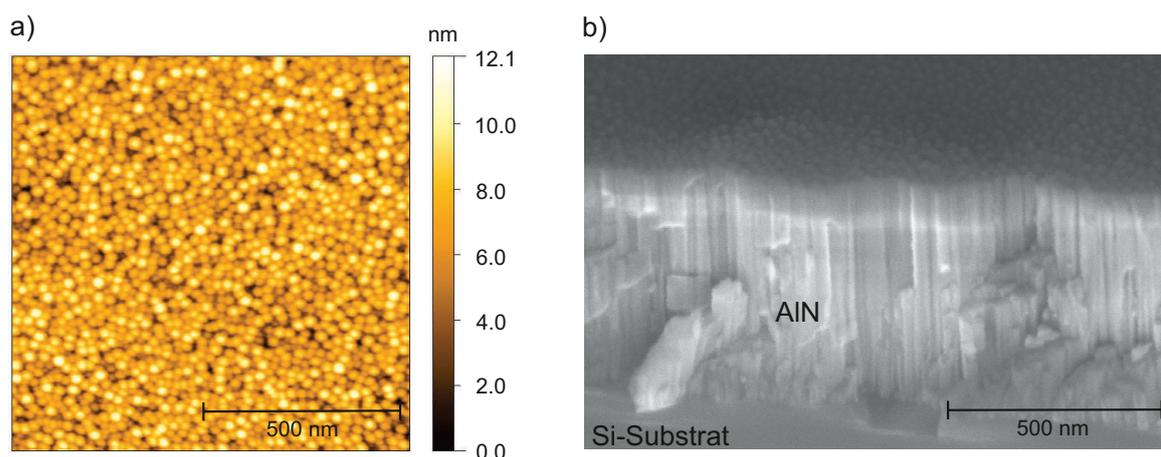


Abbildung 4.4: a) AFM-Aufnahme der Oberfläche mit einer Scangröße von $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ und b) REM-Aufnahme der Bruchkante einer 500 nm dicken gesputterten AlN-Schicht auf Si(100)

In dieser Arbeit wurden zur morphologischen Untersuchung der hergestellten Dünnschichten ein Rasterkraftmikroskop (AFM, engl.: *atomic force microscope*) *Dimension Icon-System* der Firma Bruker verwendet und die Proben ausschließlich im Tapping-Modus mit einer Scanrate von 0,5 Hz und einer Bildauflösung von 512×512 Bildpunkten vermessen. Zusätzlich wurde zur Strukturanalyse der c-achsentexturierten AlN-Schichten ein Rasterelektronenmikroskop (REM) *SUPRA 55VP* der Firma Carl Zeiss eingesetzt. Abbildung 4.4a zeigt die AFM-Aufnahme der Oberfläche einer 500 nm dicken AlN-Schicht auf einem $4''$ -Si(100)-Substrat. Die Scangröße für diese AFM-Messung beträgt $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$. In dieser Aufnahme sind die einzelnen kreisrunden Körner der polykristallinen AlN-Schicht mit Korngrößen im Bereich von 10 nm bis 40 nm deutlich erkennbar. Der quadratische Mittelrauwert, die sogenannte RMS-Rauheit (engl.: *root mean square*), der AlN-Dünnschicht beträgt 1,6 nm. Sie ist definiert über

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2}. \quad (4.8)$$

Hierbei ist z_i die Höhenabweichung der i -ten Messung von einer gemittelten Idealfäche. Für die REM-Aufnahme in Abbildung 4.4b wurde die Probenoberfläche verkippt, um neben der Oberfläche die Bruchkante einer 500 nm dicken AlN-Schicht auf Si(100) zu zeigen. Die REM-Aufnahme zeigt eine ebene Oberflächenbeschaffenheit und die säulenartige Struktur der AlN-Kristallite, die senkrecht zur Substratoberfläche ausgerichtet sind.

Die Kristallstruktur der polykristallinen AlN-Dünnschichten wurde zusätzlich mittels Röntgendiffraktometrie (XRD, engl.: *X-Ray diffraction*) analysiert. Die Röntgendiffraktogramme der in der Arbeit verwendeten Dünnschichten wurden an einem Pulverdiffraktometer *StadiP* der Firma Stoe gemessen. Die Röntgenstrahlung wird hierbei durch eine Kupferanode erzeugt. Durch die Verwendung eines Germanium(111)-Monochromators wird jedoch lediglich die Cu- $K_{\alpha 1}$ -Strahlung ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) ausgenutzt. Zur Charakterisierung der Phase und Textur der polykristallinen AlN-Dünnschichten wurden zwei unterschiedliche Messverfahren verwendet, der $\Theta/2\Theta$ -Scan in der Bragg-Geometrie und der ω -Scan zur Aufzeichnung der sogenannten Rocking-Kurve. Die Strahlengeometrie für die jeweilige Messkonfiguration ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

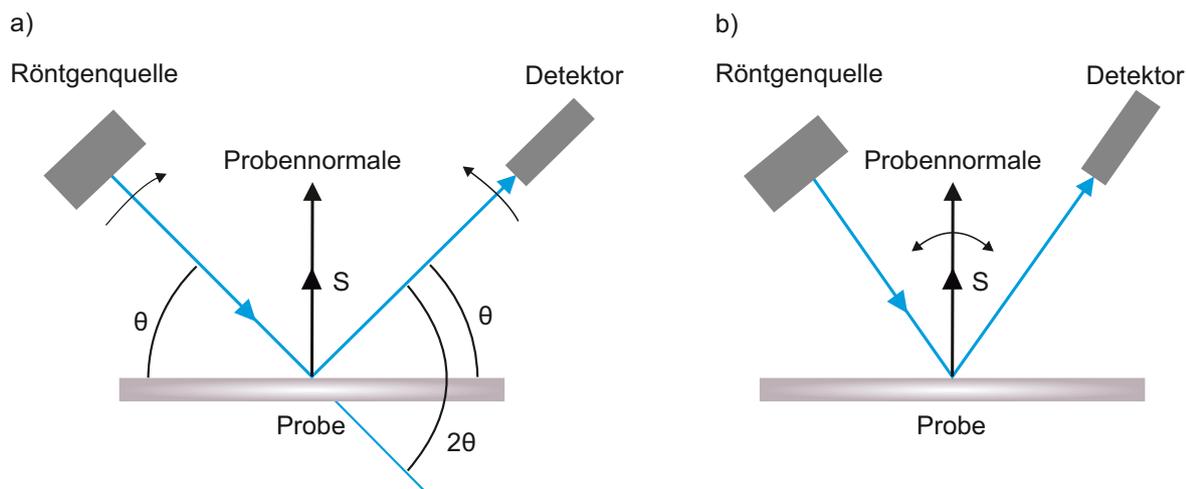


Abbildung 4.5: Strahlengeometrie für a) $\Theta/2\Theta$ -Scans und b) ω -Scans bei Röntgendiffraktometriemessungen. Hierbei ist S der Streuvektor, der die Differenz aus einlaufendem und auslaufendem Wellenvektor darstellt.

Bei der $\Theta/2\Theta$ -Geometrie wird der Winkel Θ der einfallenden monochromatischen Röntgenstrahlung bezüglich der Probenoberfläche von kleinen zu großen Winkeln variiert und der Detektor kontinuierlich unter dem Winkel 2Θ mitgedreht. Dieser misst die Intensität der gebeugten Röntgenstrahlen in Abhängigkeit des Winkels 2Θ . Die Probe ist so angeordnet, dass die Probennormale des Si(100)-Substrates immer parallel zum Streuvektor S ist. Das aufgenommene Röntgendiffraktogramm bei unterschiedlichen Einfallswinkel Θ wurde mit den Daten aus einer materialspezifischen Datenbank verglichen. Die Röntgenreflexe beschreiben die jeweilige Reflexion einer bestimmten Netzebenenschar, d.h. der 002-Reflex des Aluminiumnitrids bezeichnet die reflektierte Strahlung an der (002)-Ebene des AlN-Gitters. In der Bragg-Geometrie werden nur die Netzebenenscharen gemessen, die parallel

zur Probenoberfläche liegen. Bei dem ω -Scan wird der Detektor und die Röntgenquelle fixiert auf den 2Θ -Wert des Hauptreflexes. Bei der Charakterisierung der in dieser Arbeit vorgestellten polykristallinen AlN-Dünnschichten wird der Detektor auf den Winkel des AlN 002-Reflexes ($2\Theta = 36,04^\circ$) justiert. Die Probe wurde anschließend relativ zur Röntgenquelle und Detektor um den Winkel $\omega = 18,02^\circ$ gekippt und die Intensität der Röntgenstrahlung in Abhängigkeit des Kippwinkels ω aufgenommen. Bei perfekt orientierten Proben ist der Intensitätsverlauf sehr scharf. Die Halbwertsbreite (FWHM, engl.: *full width at half maximum*) der gemessenen Rocking-Kurve ermöglicht eine systematische Analyse der Kristallverkipnungen relativ zum Substrat und somit über die Qualität der Textur. Die Verbreiterung der Röntgenreflexe und die Verschiebung des Beugungswinkels lassen Rückschlüsse auf die Kristallitgrößen bzw. auf eine Änderung der Gitterparameter, z. B. durch Verspannungen in der AlN-Schicht, zu.

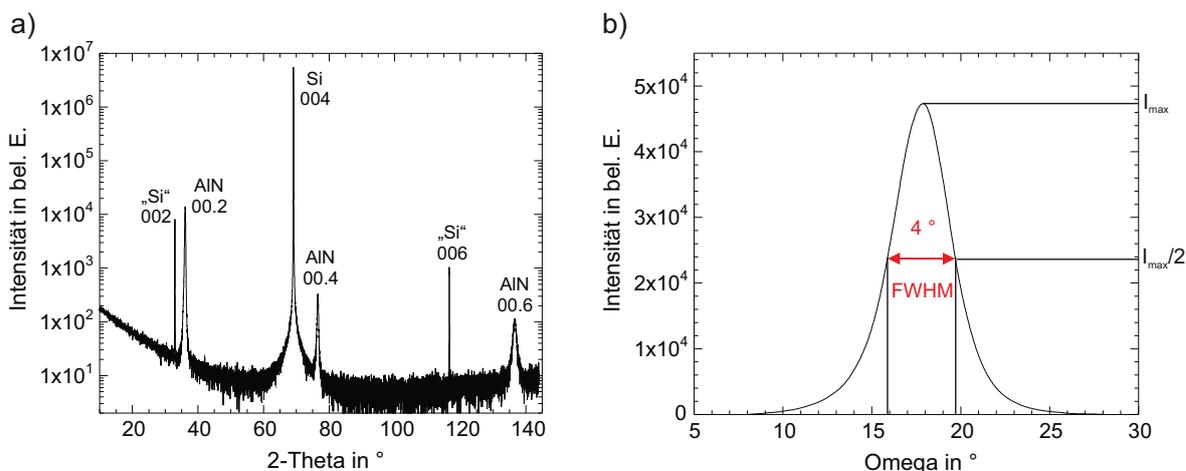


Abbildung 4.6: a) Röntgendiffraktogramm und b) ω -Scan einer 500 nm dicken AlN-Schicht auf Si(100). Die AlN-Schicht besitzt eine perfekte c-Achsentextur, da lediglich die (00.l)-Reflexe auftreten. Die Halbwertsbreite (FWHM) beträgt 4° .

Abbildung 4.6a zeigt das Röntgendiffraktogramm und Abbildung 4.6b die Rocking-Kurve einer 500 nm dünnen polykristallinen AlN-Schicht auf Si(100), die für die Herstellung der AlN/Si_xN_y-Mikrolinsen verwendet wurde. In dem Röntgendiffraktogramm sind deutlich drei AlN-Reflexe zu erkennen, der (00.2)- bei $36,08^\circ$, der (00.4)- bei $76,55^\circ$ und der (00.6)-Reflex bei $136,6^\circ$. Diese stellen höherindizierte Ebenen der (00.1)-Kristallebenen dar. Zusätzlich sind aufgrund der hohen Eindringtiefe der Röntgenstrahlung die Reflexe des kristallinen Si-Substrates zu erkennen. Da ausschließlich (00.l)-Reflexe des hexagonalen AlN im Röntgendiffraktogramm zu erkennen sind, kann eine c-Achsentextur der verwendeten AlN-Schichten und somit eine gute Kristallqualität angenommen werden. Zur genaueren Untersuchung der Textur in der AlN-Dünnschicht wurde exemplarisch ein ω -Scan durchgeführt. Die Rocking-Kurve wurde mit der Pseudo-Voigt-Funktion angenähert und die Halbwertsbreite bestimmt. Für die in dieser Arbeit verwendeten AlN-Dünnschichten mit Schichtdicken von 300 - 500 nm liegt die Halbwertsbreite zwischen $3 - 5^\circ$, weshalb von einer guten Textur ausgegangen werden kann. Die AlN-Dünnschichten sollten somit einen hohen piezoelektrischen Wirkungsgrad zeigen. Tonisch et al. haben gezeigt, dass eine Halbwertsbreite der Rocking-Kurve bis zu 10° keinen negativen Einfluss auf die piezoelektrischen Koeffizienten hat [129]. Bei dickeren AlN-Schichten ist die Halbwertsbreite der Rocking-Kurve geringer und somit die c-Achsenorientierung des Kristallgitters stärker [196].

In dem Röntgendiffraktogramm ist eine Verschiebung der Beugungswinkel zu niedrigeren Winkeln hin zu erkennen, was auf eine lokale mechanische Verspannung der AlN-Schicht von +900 MPa zurückzuführen ist. Eine genaue Untersuchung der Verspannungen der abgeschiedenen Materialien ist gerade für die Herstellung von Dünnschichtmembranen von großer Wichtigkeit, da die Schichtverspannungen einen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von MEMS-Bauelementen haben [192]. Sehr hohe Schichtspannungen führen zu einer starken Wölbung des Substrates oder zum Ablösen der Dünnschicht und verhindern somit die weitere Fabrikation des Bauelementes. Die mechanischen Schichtspannungen setzen sich aus den intrinsischen σ_i und thermischen Spannungen σ_{th} zusammen. Eine thermische Spannung entsteht aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten von Substrat und Schicht beim Abkühlen nach der Abscheidung. Je größer die Differenz der Ausdehnungskoeffizienten von Substrat und Schicht, desto größer ist die thermische Verspannung des Gesamtsystems. AlN besitzt bei Raumtemperatur einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten entlang der a-Achse von $\alpha_{AlN_{\parallel}} = 4.2 \times 10^{-6} /K$ und entlang der c-Achse von $\alpha_{AlN_{\perp}} = 5.3 \times 10^{-6} /K$ wohingegen Si einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha_{Si} = 2.6 \times 10^{-6} /K$ aufweist [139]. Die thermisch induzierte Spannung errechnet sich nach Gleichung 4.9 [197]:

$$\sigma_{th} = \frac{E_F}{1 - \nu_F} (\alpha_F - \alpha_S) \Delta T. \quad (4.9)$$

Hierbei sind α_F und α_S die linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Schicht und des Substrates, E_F der Elastizitätsmodul und ν_F die Poissonzahl der Schicht und ΔT die Temperaturdifferenz zwischen Wachstums- und Raumtemperatur. Eine tensile Spannung entsteht, wenn der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient der Schicht größer ist als der des Substrates. Im umgekehrten Fall liegt eine kompressive Spannung vor [198]. Für die 500 nm dünnen AlN-Schichten ergeben sich mit $E_{Si} = 130$ GPa und $\nu_{Si} = 0,22$ thermisch induzierte Spannungen von +130 MPa bei einer Wachstumstemperatur von 300°C.

Die intrinsische Spannung ist eine strukturell induzierte Schichtspannung, welche die Schicht bei der Wachstumstemperatur besitzt. Sie kann durch eingebaute Fremdatome, durch die kinetische Energie der Atome, die auf die Schichtoberfläche treffen, durch unterschiedliche Oberflächenenergien von Substrat und Film, durch die kristalline Struktur der Schichten sowie durch eine Gitteranpassung der Schichtstruktur an die Substratstruktur verursacht werden [71]. Diese intrinsischen Spannungen für gesputterte Dünnschichten können sowohl Druck- als auch Zugspannungen sein.

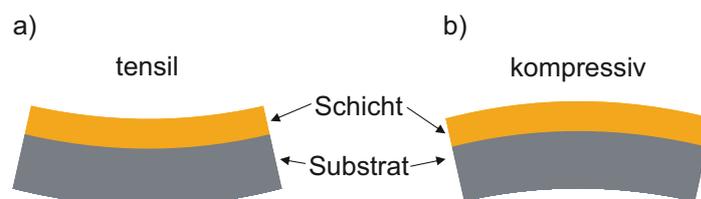


Abbildung 4.7: Einfluss von tensiler und kompressiver Verspannung auf die Krümmung des Substrates

Zugverspannte bzw. tensile Schichten haben positive Spannungswerte ($\sigma > 0$) und druckverspannte bzw. kompressive Schichten negative Spannungswerte ($\sigma < 0$). Der Einfluss von tensiler und kompressiver Verspannung auf die Krümmung des Substrates ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Zugverspannung des Filmes führt zu einer konkav verbogenen Grenzfläche wohingegen bei der Druckspannung des Filmes eine konvex verbogene Grenzfläche entsteht.

Die Eigenspannung ($\sigma_i + \sigma_{th}$) der AlN-Dünnschichten wurde mittels Waferkrümmungsmessungen vermessen. Bei dieser Methode wird der Krümmungsradius des Substrates vor und nach der Beschichtung berührungslos bestimmt. Dafür wird die Ablenkung eines Laserstrahls an der Oberfläche an vielen Messpunkten vermessen und aus diesen Messwerten der Krümmungsradius errechnet. Die Schichtspannung σ_0 lässt sich mit den vorher bestimmten Krümmungsradien mit der Stoney-Gleichung berechnen [199]

$$\sigma_0 = \frac{E_S}{6(1 - \nu_S)} \frac{d_S^2}{d_F} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_0} \right), \quad (4.10)$$

mit E_S dem Elastizitätsmodul und ν_S der Poissonzahl des Substrates, d_S der Substratdicke, d_F der Schichtdicke des Dünnschichtes, R_0 dem Krümmungsradius des Substrates und R_1 dem Krümmungsradius nach dem Schichtwachstum. Die Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Gleichung ist, dass die Dicke der abgeschiedenen Schicht deutlich geringer ist als die Substratdicke. Für die 500 nm dünnen AlN-Schichten ergeben sich mit $E_{Si} = 130$ GPa und $\nu_{Si} = 0,22$ Schichtspannungen σ_0 im Bereich von -300 (Druckspannung) bis +300 MPa (Zugspannung). Mit dieser Methode können ausschließlich globale Schichtspannungen bestimmt werden. Lokale Schichtspannungen können mittels Waferkrümmungsmessungen nicht ermittelt werden. Die Stressverteilung in den AlN-Dünnschichten ist allerdings aufgrund der Anlagengeometrie sehr inhomogen. Dadurch weichen die lokalen Schichtspannungen deutlich voneinander ab. Dennoch bieten die in dieser Arbeit verwendeten AlN-Schichten eine gute Basis für die Herstellung von mechanisch stabilen Membran-basierten Mikrolinsen.

4.4 Piezoelektrische Eigenschaften der AlN-Dünnschichten

Um die in Kapitel 3.1 beschriebenen Anforderungen der verstimmbaren Mikrolinsen zu erfüllen, müssen die verwendeten Dünnschichten eine hohe piezoelektrische Leistungsfähigkeit erreichen. Aus diesem Grund ist es wichtig, die piezoelektrischen Eigenschaften der hergestellten AlN-Dünnschichten zu bestimmen. Zur Beschreibung der piezoelektrischen Eigenschaften wird der piezoelektrische Koeffizient d_{33} einer 300 nm und einer 500 nm dicken N-polaren AlN-Schicht auf Si(100) verwendet. Da die Piezokristalle nicht frei stehen, sondern auf einem Si-Substrat aufgebracht werden, können nur Effektivwerte des d_{33} -Koeffizienten bestimmt werden. Diese sind geringer als die Koeffizienten des Volumenmaterials d_{33}^b , da bei der Vermessung der Dünnschichten auf Si(100) das Substrat die Dehnung des Piezokristalls an der Grenzfläche verhindert. Diese Besonderheit wird in der Literatur als *substrate clamping* bezeichnet [153]. Der effektive d_{33} -Wert der gemessenen Dünnschicht kann in den d_{33}^b -Koeffizienten des Volumenmaterials umgerechnet werden. Der piezoelektrische Effekt des Volumenmaterials d_{33}^b ist gegeben durch [200]

$$d_{33}^b = d_{33} + \frac{2S_{13}}{S_{11} + S_{12}} d_{31}. \quad (4.11)$$

Dabei sind S_{11} , S_{12} und S_{13} die elastischen Konstanten (siehe Kapitel 5.3) und d_{31} der transversale piezoelektrische Koeffizient. In der Literatur wird dieser Effekt nicht immer berücksichtigt und oft nur der effektive d_{33} -Wert angegeben. Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden die gemessenen d_{33} -Koeffizienten in dieser Arbeit ohne die Berücksichtigung des *substrate clamping*-Effektes betrachtet.

Die Bestimmung des piezoelektrischen Koeffizienten kann mithilfe direkter oder indirekter Messverfahren durchgeführt werden. Zu den direkten Messmethoden zählen u. a. die Piezoreaktions-Kraft-Mikroskopie [201] und zu den indirekten die Bestimmung des piezoelektrischen Koeffizienten über den elektromechanischen Kopplungsfaktor mittels Oberflächenwellenfiltern [202]. Darüber hinaus kann der piezoelektrische Koeffizient anhand von Kapazitätsänderungen bestimmt werden [203].

Für die Messung des d_{33} -Koeffizienten der in dieser Arbeit verwendeten AlN-Schichten wurde ein konventionelles Berlincourt-Meter (PiezoMeter *PM300*) der Firma Piezotest verwendet, da für diese Messmethode keine aufwendige und komplexe Probenvorbereitung notwendig ist und eine schnelle Messdurchführung gewährleistet ist. Vor der Messung der piezoelektrischen Eigenschaften der AlN-Dünnschichten werden Titanvorderseitenkontakte mit Dicken von 300 nm und Durchmessern zwischen 2 mm und 5 mm auf die AlN-Schichten aufgebracht. Anschließend werden die 3"- bzw. 4"-Wafer gespalten und die Messpunkte separat vermessen. Eine schematische Darstellung des Messaufbaus ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

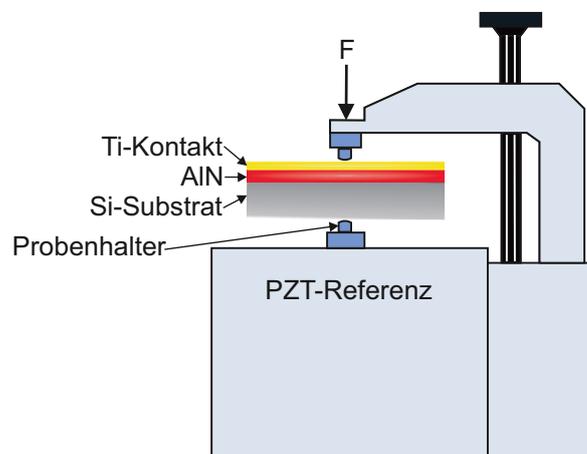


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung des Piezotesters mit eingespannter AlN/Si-Probe zur Messung des d_{33} -Koeffizienten einer AlN-Schicht

Die Proben mit der zu untersuchenden piezoelektrischen Schicht wurden im Messaufbau eingespannt und mit einer alternierenden Kraft von 0,25 N bei 110 Hz belastet. Dabei wird eine elektrische Ladung erzeugt, welche mit einer internen PZT-Referenzprobe verglichen wird. Daraus wird der d_{33} -Koeffizienten berechnet. Die d_{33} -Koeffizienten konnten mit einer Auflösung von 0,01 pm/V bestimmt werden. Für eine detaillierte Beschreibung dieser Messmethode sei auf [204] verwiesen. Der d_{33} -Koeffizient der gemessenen N-polaren AlN-Schichten mit Schichtdicken von 300 nm bis 500 nm konnte zwischen -3 pm/V bis -5 pm/V bestimmt werden und stimmt somit gut mit den Literaturwerten überein. Ein Literatur-

überblick über gemessene d_{33} - und d_{31} -Koeffizienten von unterschiedlich hergestellten AlN-Schichten kann [184, 205] entnommen werden.

Neben den piezoelektrischen Eigenschaften ist die Durchbruchfeldstärke ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Schichtqualität. Die Durchbruchfeldstärke dünner AlN-Schichten wurde durch die Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien bestimmt und liegt für eine 300 - 500 nm dünne AlN-Schicht zwischen 0,5 MV/cm und 1 MV/cm. Die Referenzwerte für die Durchbruchfeldstärke von AlN in der Literatur liegen zwischen 4 MV/cm und 12 MV/cm [143, 144]. Diese Werte konnten mit den in dieser Arbeit verwendeten AlN-Schichten nicht erreicht werden. Jedoch sind die experimentellen Werte für die Durchbruchfeldstärke ausreichend hoch, um eine elektrische Aktuierung der verstimmbaren Mikrolinsen bis ≤ 20 V zu gewährleisten.

Die im Rahmen dieser Arbeit hergestellten polykristallinen AlN-Dünnschichten weisen gute piezoelektrische Eigenschaften auf und eignen sich somit hervorragend zur Herstellung von piezoelektrisch aktuierten Mikrolinsen. Im nächsten Kapitel werden die AlN-Schichten zur Herstellung von verstimmbaren AlN/Si_xN_y-Mikrolinse verwendet.

5 AIN/Si_xN_y-Mikrolinse

Für die Entwicklung neuer verstimmbarer Mikrolinsen basierend auf dem unimorphen Prinzip wurde zu Beginn der Arbeit eine Schichtkombination aus Aluminiumnitrid und Siliziumnitrid gewählt. Die AIN-Schicht stellt hierbei die piezoelektrische und die Si_xN_y-Schicht die elastische Komponente dar. Beide Ausgangsmaterialien sind in der Halbleiterindustrie weit verbreitet.

Zu Beginn dieses Kapitels wird das neuartige Design der AIN/Si_xN_y-Multisegment-Mikrolinse und die Herstellung der Einzel- und Heterostrukturen vorgestellt. Im Anschluss daran werden die mechanischen und optischen Eigenschaften der Einzelschichten und der unimorphen Struktur untersucht. Dabei wird besonders die Eignung der AIN/Si_xN_y-Heterostruktur für Membran-basierte Mikrolinsen diskutiert. Anschließend wird die Herstellung der Bauelemente mittels mikrotechnologischer Verfahren beschrieben. Anhand eines elektromechanischen Modells soll die theoretisch mögliche Wirkungsweise der Linse simuliert werden. Im Anschluss werden die AIN/Si_xN_y-Mikrolinsen elektromechanisch mittels Weißlichtinterferometrie (WLI) und Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) charakterisiert und die Ergebnisse mit den Simulationen verglichen. Abschließend wird die optische Leistungsfähigkeit der Linsen durch die Vermessung von Wellenfrontänderungen mittels eines Shack-Hartmann-Sensors (SHS) veranschaulicht. Dabei wird die gezielte Manipulation von Wellenfronten durch die piezoelektrische Aktuierung der AIN/Si_xN_y-Mikrolinsen demonstriert.

5.1 Design der AIN/Si_xN_y-Multisegment-Mikrolinse

In Kapitel 3.4 wurde bereits das allgemeine, neuartige Design der verstimmbaren Mikrolinsen vorgestellt. Bei der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse fungiert die AIN-Schicht als piezoelektrische und die Si_xN_y-Schicht als elastische Schicht. In Abbildung 5.1 ist der schematische Aufbau und die Heterostruktur der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse dargestellt.

Die Basis dieser Linse bildet ein 500 µm dicker Si-Chip, auf welchem eine 500 nm dicke AIN-Schicht abgeschieden wird. Zur Kontaktierung der AIN-Schicht wird eine 50 nm dünne ITO-Schicht aufgebracht, die anschließend bei 300 °C für 5 Minuten in einer Sauerstoff-Atmosphäre nachgetempert wird. Die elastische 500 nm dicke Si_xN_y-Schicht wird auf die ITO-Elektrode aufgebracht. Die untere, 50 nm dünne ITO-Elektrode wird nach dem Freilegen der Membran durch das Ätzen des Si-Substrates abgeschieden. Die Gesamtdicke der Mikrolinse beträgt 1,1 µm. Die ITO-Elektroden werden mithilfe von Nickel/Platin/Gold-Kontaktverstärkungen elektrisch kontaktiert. Durch die erhöhte Leitfähigkeit des verwendeten Si-Substrates mit einem Widerstand von 0,1 - 0,2 Ωcm kann die untere ITO-Elektrode von der Frontseite über den Si-Wafer kontaktiert werden. Um die Linsenmembran in vier unabhängige Segmente zu unterteilen, werden vier dünne Gräben in die Si_xN_y-Schicht und in die vergrabene ITO-Elektrode geätzt. Zusätzlich werden zur optimalen Ansteuerung des AIN-Aktors die Si_xN_y-Schicht und die ITO-Elektrode geöffnet. Durch Variieren der elektrischen Spannung kann die Linsenkrümmung aktiv gesteuert werden. Wird an allen

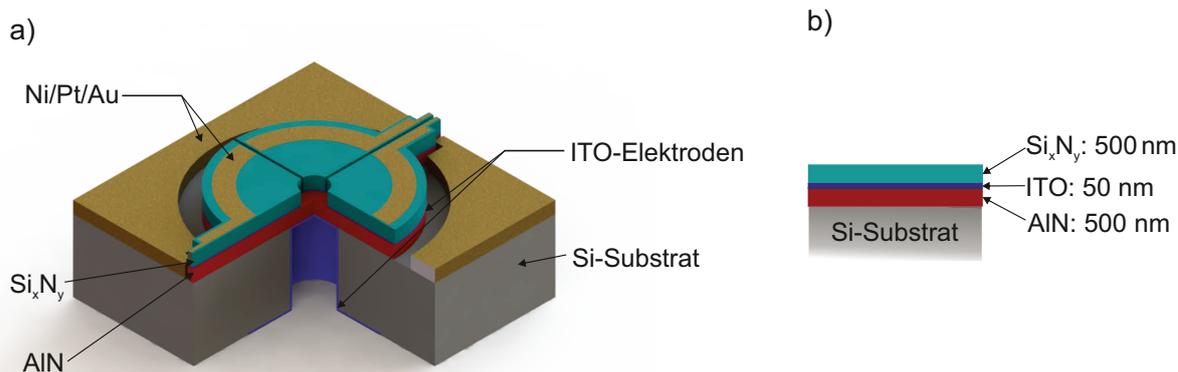


Abbildung 5.1: a) Schematischer Aufbau und b) Heterostruktur der verstimmbaren AlN/Si_xN_y-Mikrolinse. Die Linse besteht aus einer unimorphen Membran sowie einer unteren und einer oberen ITO-Elektrode zur Ansteuerung der piezoelektrischen AlN-Schicht. Die obere ITO-Elektrode ist in vier unabhängige Segmente unterteilt. Die AlN-Schicht ist hierbei in rot, die Si_xN_y-Schicht in türkis und die ITO-Elektroden in blau dargestellt.

Sektoren die gleiche Spannung angelegt, kommt es zu einer symmetrischen Verformung der Membran. Werden an einzelnen oder mehreren Sektoren eine unterschiedliche Spannung angelegt, kann die Linsenmembran asymmetrisch verformt werden.

5.2 Herstellung der Dünnschichten

Indiumzinnoxid

Die ITO-Dünnschichten für diese Arbeit wurden mithilfe einer Hochfrequenz-Magnetron-sputteranlage *Univex 300* der Firma Leybold hergestellt. Dafür wird ein keramisches ITO-Target (In₂O₃/SnO₂, 90/10 wt%) mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Reinheit von 99,99 % verwendet. Für die Herstellung der AlN/Si_xN_y-Mikrolinsen wurden 50 nm dünne ITO-Schichten auf die 500 nm dicken AlN-Schichten durch Zugabe von Sauerstoff im Sputtergas aufgebracht. Vor der ITO-Abscheidung wurden die AlN/Si-Substrate für kurze Zeit in Flusssäure getaucht. Nach der Reinigung wurden die AlN/Si-Wafer in die Anlage geschleust und die Druckkammer evakuiert. Die Prozessparameter zur Herstellung von ITO-Dünnschichten sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Die ITO-Dünnschichten wurden bei Raumtemperatur abgeschieden und sind amorph. Die Dichte der hergestellten ITO-Schichten beträgt 7,2 g/cm³. Im Anschluss an die Schichtdeposition wurden die ITO-Schichten bei 300 °C für 5 Minuten in einer Sauerstoff-Atmosphäre nachgetempert und somit auskristallisiert, um die Leitfähigkeit zu erhöhen [138]. ITO kristallisiert wie Indiumoxid (In₂O₃) in der kubischen Bixbyitstruktur und lässt sich der Raumgruppe Ia₃ zuordnen. Die Gitterkonstante beträgt zwischen 10,00 Å und 10,05 Å und ist somit etwas geringer als die Gitterkonstante für In₂O₃ mit 10,118 Å, was auf den kleineren Sn⁴⁺-Ionenradius im Gegensatz zu dem In³⁺-Ionenradius zurückzuführen ist [206].

Zur Charakterisierung der Schichtmorphologie wurde eine 50 nm dünne ITO-Schicht auf einem 4"-Siliziumsubstrat mit den Standard-Prozessparametern abgeschieden und anschließend bei 300 °C getempert. Abbildung 5.2a zeigt die AFM-Aufnahme der Oberfläche einer 50 nm dünnen ITO-Schicht auf Si(100). Die Scangröße für diese Messung beträgt 1 µm x 1 µm. In dem AFM-Bild sind die Körner der ITO-Schicht mit Korngrößen im Bereich

Tabelle 5.1: Standard-Prozessparameter für die Herstellung von ITO-Dünnschichten

Parameter	Wert
Frequenz in MHz	13,56
Target-Substratabstand in mm	90
Leistung in W	250
Basisdruck in mbar	9×10^{-5}
Prozessdruck in mbar	10^{-2}
Argon-Fluss in ml/min	25
Sauerstoff-Fluss in ml/min	0,4
Wachstumsrate in nm/min	76
Wachstumstemperatur in °C	RT

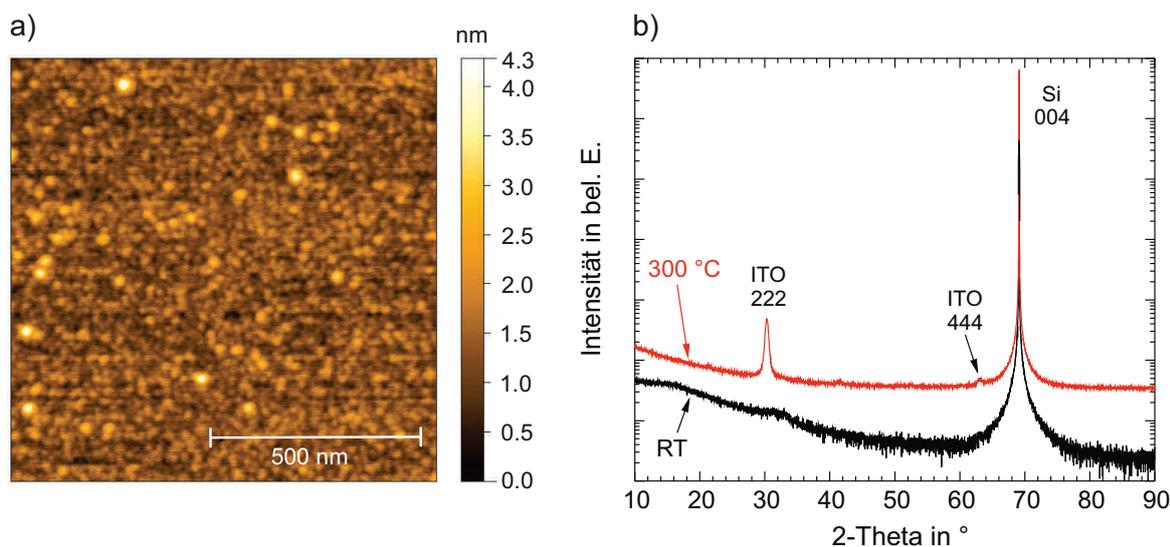


Abbildung 5.2: a) AFM-Aufnahme der ITO-Oberfläche mit einer Scangröße von $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ und b) Röntgendiffraktogramm einer 50 nm dicken ITO-Schicht auf Si(100) nach Abscheidung (schwarz) und Temperung bei $300 \text{ }^\circ\text{C}$ für 5 Minuten in einer O_2 -Atmosphäre (rot)

zwischen 15 nm bis 50 nm erkennbar. Der RMS-Wert der ITO-Schicht beträgt 0,37 nm. Des Weiteren wurden XRD-Messungen in der $\theta/2\theta$ -Geometrie an den ITO-Schichten durchgeführt. In Abbildung 5.2b ist das Röntgendiffraktogramm einer 50 nm dicken Schicht aus ITO nach der Abscheidung (schwarze Kurve) und nach der Temperung bei $300 \text{ }^\circ\text{C}$ (rote Kurve) abgebildet. Im Röntgendiffraktogramm der ITO-Probe direkt nach der Abscheidung sind keine Reflexe erkennbar, da ITO in der amorphen Phase vorliegt. Es ist lediglich der Si(004)-Reflex des Substrates sichtbar. Die polykristalline Struktur des Indiumzinnoxids nach der Temperung wurde durch die Röntgenstrukturanalyse bestätigt. Dabei ist der intensivitätsstärkste Peak der (222)-Reflex bei $30,4^\circ$. Das Röntgendiffraktogramm entspricht der Bixbyitstruktur.

Siliziumnitrid

Dünnschichten aus Si_xN_y werden überwiegend mittels Kathodenzerstäuben [207] oder CVD [208] hergestellt. Für viele Halbleiter- oder MEMS-Bauelemente sind Herstellungstemperaturen von unter 400 °C erforderlich. Aus diesem Grund werden hauptsächlich plasmaunterstützte CVD-Abscheidanlagen (PECVD, engl.: *plasma-enhanced chemical vapour deposition*) verwendet [209].

Bei der CVD werden Substanzen in der Gasphase zur Reaktion gebracht, welche auf der Substratoberfläche kondensieren und somit eine feste Schicht bilden [194]. Bei der PECVD wird die Energie zur Dissoziation des Ausgangsstoffes durch eine Gasentladung bereitgestellt. Hierbei wird in der Reaktionskammer ein Plasma erzeugt, welches als Energiereservoir für schnelle Elektronen dient. Diese Elektronen können die Energie auf die gasförmigen Reaktanden übertragen und bewirken die Dissoziation der Ausgangsstoffe. Zur Herstellung von Si_xN_y-Schichten werden Silan SiH₄ und Ammoniak NH₃ als Prozessgase verwendet.

Die in dieser Arbeit verwendeten Dünnschichten aus Si_xN_y wurden mittels einer PECVD-Anlage der Firma Oxford Instruments hergestellt. Bei der verwendeten Anlage handelt es sich um einen Parallel-Platten-Reaktor mit einem 13,56 MHz Hochfrequenz- und einem 100 kHz Niedrigfrequenzgenerator. Der geerdete Substratteller ist heizbar und bildet gleichzeitig die Substratelektrode. Die 500 nm dicken Si_xN_y-Schichten für die Herstellung der AlN/Si_xN_y-Mikrolinsen wurden direkt nach der ITO-Deposition auf das ITO/AlN/Si-Substrat bei einer Substrattemperatur von 300 °C abgeschieden. Die Prozessparameter zur Herstellung der Si_xN_y-Dünnschichten sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Standard-Prozessparameter für die Herstellung von Si_xN_y-Dünnschichten

Parameter	Wert
Frequenz in MHz	13,56 und 0,1
Prozessdruck in mbar	$< 6 \times 10^{-6}$
Wachstumsrate in nm/min	12,5
Wachstumstemperatur in °C	300

Die Schichtmorphologie der hergestellten 500 nm dicken Si_xN_y-Schichten auf dem ITO/AlN/Si-Substrat wurde mit dem Rasterkraftmikroskop charakterisiert. Abbildung 5.3 zeigt exemplarisch die AFM-Aufnahme der Oberfläche einer Si_xN_y-Schicht mit einer Schichtdicke von 500 nm. Der RMS-Wert der Si_xN_y-Schicht ist sehr gering und beträgt 1,8 nm und liegt damit im selben Größenbereich wie die Rauheit der darunterliegenden AlN-Schicht (RMS = 1,6 nm).

Die Realisierung von mechanisch stabilen verstimmbaren Mikrolinsen erfordert eine umfangreiche Charakterisierung der Materialkombinationen bezüglich ihrer elastischen und optischen Eigenschaften. Aus diesem Grund wurden nach der Herstellung der Dünnschichten die elastischen und optischen Eigenschaften der Einzel- und Mehrlagenstrukturen ausführlich untersucht und ihre Eignung für Membran-basierte verstimmbare Mikrolinsen bewertet.

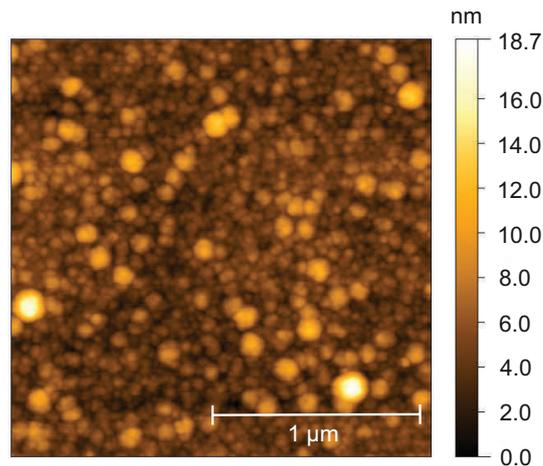


Abbildung 5.3: AFM-Aufnahme der Oberfläche einer 500 nm dicken Si_xN_y -Schicht auf einem ITO/AlN/Si(100)-Substrat. Die ITO-Schicht hat eine Schichtdicke von 50 nm und die AlN-Schicht eine Dicke von 500 nm. Die Scangröße beträgt $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$.

5.3 Elastizität der Einzel- und Heterostrukturen

Die in dieser Arbeit entwickelten verstimmbaren AlN/ Si_xN_y -Mikrolinsen mit einer Gesamtdicke $\leq 1 \mu\text{m}$ bestehen aus unimorphen Dünnschichtmembranen, wobei der piezoelektrische Aktor in die Linsenmembran integriert ist. Die unimorphen Membranen müssen, gemäß den Anforderungen in Kapitel 3.1, eine hohe mechanische Stabilität und Flexibilität aufweisen, um eine große Auswölbung der Membran zu gewährleisten. Die mechanischen Eigenschaften dünner Schichten schließen E-Modul, Zug- bzw. Bruchfestigkeit, Härte und die mechanische Schichtspannung ein [71].

Der E-Modul ist definiert als das Verhältnis aus Spannung und Dehnung und ist ein Maß für den Widerstand eines Materials gegen seine Verformung [210]. Der Zusammenhang zwischen den dreidimensionalen Spannungs- und Dehnungszuständen eines Festkörpers ist für genügend kleine Verformungen linear-elastisch und wird mathematisch durch das Hooke'sche Gesetz beschrieben:

$$\vec{\sigma} = C\vec{\varepsilon}. \quad (5.1)$$

Hierbei ist $\vec{\sigma}$ der Spannungsvektor, C die Steifigkeitsmatrix und $\vec{\varepsilon}$ der Dehnungsvektor. Der Spannungsvektor setzt sich aus den Normalspannungen σ_i , den Komponenten senkrecht zur Bezugsfläche, und den Schubspannungen τ_{ij} , den Komponenten in der Fläche, zusammen. Da der Spannungsvektor immer symmetrisch ist ($\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ und $\tau_{yz} = \tau_{zy}$), kann er als 6×1 -Matrix veranschaulicht werden:

$$\vec{\sigma} = [\sigma_x; \sigma_y; \sigma_z; \tau_{xy}; \tau_{xz}; \tau_{yz}]^T. \quad (5.2)$$

Der Dehnungsvektor $\vec{\varepsilon}$ wird durch die Komponenten der Dehnung ε_i entlang der i -Achse und durch die Scherungen γ_{ij} in der ij -Ebene beschrieben. Der Dehnungsvektor ist ebenfalls symmetrisch ($\gamma_{xy} = \gamma_{yx}$, $\gamma_{xz} = \gamma_{zx}$ und $\gamma_{yz} = \gamma_{zy}$) und wird durch Gleichung 5.3 dargestellt:

$$\vec{\varepsilon} = [\varepsilon_x; \varepsilon_y; \varepsilon_z; \gamma_{xy}; \gamma_{xz}; \gamma_{yz}]^T. \quad (5.3)$$

Die Steifigkeitsmatrix enthält als 6×6-Matrix 36 Einträge unter Anwendung der Voigt-Notation. Der Tensor der Steifigkeitskonstanten C_{ij} beschreibt die Anisotropie des Elastizitätsmoduls. Da AlN in der hexagonale Wurtzitstruktur (Raumgruppe 6mm, C_{6V}) kristallisiert [181], verringert sich die Anzahl der Steifigkeitskonstanten [182, 210]. Einige elastische Konstanten sind aus Symmetriegründen identisch oder gleich Null. Die vereinfachte Steifigkeitsmatrix in der Voigt-Notation ist gegeben durch [211]:

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) \end{pmatrix}. \quad (5.4)$$

Für die errechneten und experimentellen Werte der elastischen Konstanten C_{ij} für AlN-Dünnschichten sei auf [130] verwiesen.

Die Berechnung des E-Moduls vereinfacht sich für c-Achsen-texturierte AlN-Schichten zu [212]:

$$E = C_{33} - \frac{2C_{13}^2}{C_{11} + C_{12}}. \quad (5.5)$$

In der Literatur wird häufig anstelle der elastischen Konstanten die Nachgiebigkeit S_{ij} (engl.: *compliance*), der reziproke Wert der Koeffizienten der Steifigkeitsmatrix (C^{-1}), angegeben. Für die Umrechnung beider Systeme gilt [211]:

$$S_{11} = \frac{C_{11}C_{33} - C_{13}^2}{(C_{11} - C_{12})[C_{33}(C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2]}, \quad (5.6)$$

$$S_{12} = -\frac{C_{12}C_{33} - C_{13}^2}{(C_{11} - C_{12})[C_{33}(C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2]}, \quad (5.7)$$

$$S_{13} = -\frac{C_{13}}{C_{33}(C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2}, \quad (5.8)$$

$$S_{33} = \frac{C_{11} + C_{12}}{C_{33}(C_{11} + C_{12}) - 2C_{13}^2}, \quad (5.9)$$

$$S_{44} = \frac{1}{C_{44}}. \quad (5.10)$$

Zur Bestimmung der elastischen Eigenschaften der AlN- und Si_xN_y-Dünnschichten wird der Bulge-Test [110, 213], oft auch als Beultest bezeichnet, und die Methode der Nanoindentierung [214, 215] eingesetzt. Beide Verfahren haben sich für die Charakterisierung mechanischer Dünnschichteigenschaften etabliert.

Die Nanoindentation ist eine hochauflösende Methode zur mechanischen Charakterisierung von Feststoffen. Dabei werden die Kraft und der Weg während eines elastisch-plastischen Kontaktes eines harten Prüfkörpers, dem sogenannten Indenter, mit der Probe vermessen. Dieses Verfahren ermöglicht die gleichzeitige Bestimmung der Materialkennwerte Härte und E-Modul. Die Nanoindentierungs-Messungen wurden mit einem Nanoindenter G200 der Firma Agilent Instruments durchgeführt. Als Spitze wurde eine abgerundete dreiseitige Berkovichpyramide aus Diamant mit einem Flankenwinkel von 65,3° und einem

Spitzenradius von 20 nm gemäß der ISO-Norm 14577 verwendet [216]. Die Auswertung der Nanoindentierungs-Messungen erfolgte nach dem am weitesten verbreitetsten Verfahren von Oliver und Pharr [217]. Als Ausgangspunkt für die Bestimmung von Härte und E-Modul dient das Kraft-Weg-Diagramm, welches bei der Eindringung der Berkovich-Spitze in eine Probenoberfläche aufgenommen wird.

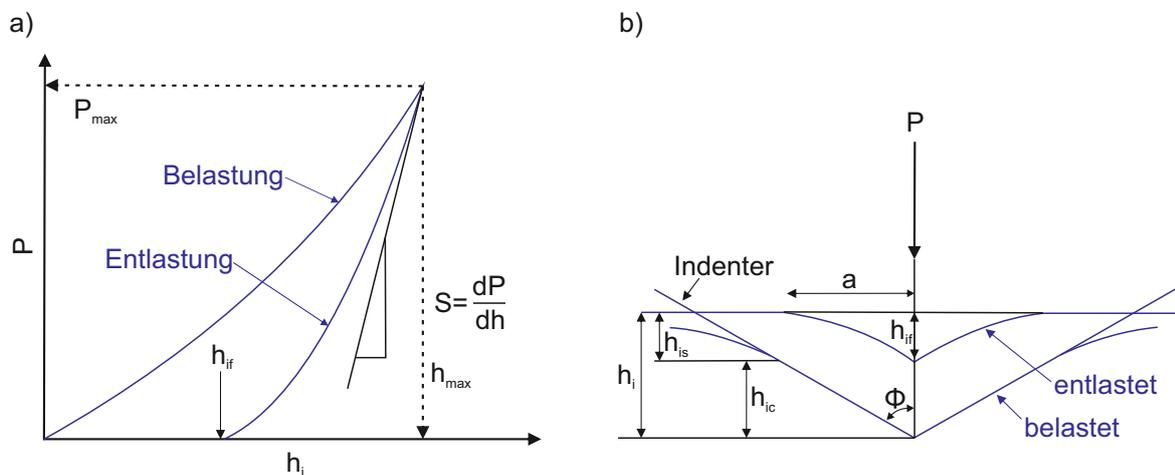


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung der a) Last- und Entlastungskurve und b) des Be- und Entladungszustand eines elastisch-plastischen Eindringversuchs mit einem Berkovich-Indenter [218]

In Abbildung 5.4a ist die Last- und Entlastungskurve und in Abbildung 5.4b der Be- und Entladungszustand eines elastisch-plastischen Eindringversuchs mit einer Berkovich-Spitze dargestellt. Aus der Kraft-Eindring-Kurve (Abbildung 5.4a) kann die maximale Kontaktkraft P_{max} , die maximale Eindringtiefe h_{max} und die Kontaktsteifigkeit S bei der Maximallast abgelesen werden. Die Eindringtiefe bei dünnen Schichten sollte relativ klein gewählt werden, um den Einfluss des Substrates auf die Messergebnisse zu vermeiden. Die minimale Eindringtiefe hängt jedoch stark von der Rauheit der Probenoberfläche ab. Die Last und die Eindringtiefe konnte mit einer Auflösung von 50 nN und 0,01 nm bestimmt werden. Voraussetzungen für die Anwendung des Verfahrens nach Oliver und Pharr sind, dass die Entladungskurve vollständig elastisch ist und die Indenterflächenfunktion der verwendeten Berkovich-Spitze in Abhängigkeit der Eindringtiefe h_{ic} bekannt ist. Diese wurde vor der Messung an einem Referenzmaterial (Quarzglas) mit vorgegebenem E-Modul und Poissonzahl ν bestimmt. Die Abhängigkeit der Eindringtiefe von der Last P kann mit Gleichung 5.11 angenähert werden [218, 219]:

$$P = \alpha(h_i - h_{if})^m. \quad (5.11)$$

Hierbei sind α und m Fitparameter, h_i die Eindringtiefe des Indenters und h_{if} die Tiefe des Resteindrucks nachdem der Indenter vollständig von der Probe entfernt wurde. Für ein Berkovichexperiment liegt m zwischen 1,2 und 1,6 und ist material- und geometrieabhängig. Die Kontaktsteifigkeit S bei maximaler Last ist gegeben durch [218]

$$S = \frac{dP}{dh_i} = \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} E_r \sqrt{A_c}, \quad (5.12)$$

mit β dem Geometrie-Korrekturfaktor für Berkovich-Spitzen mit $\beta = 1,03$ [216], E_r dem reduzierten Elastizitätsmodul und A_c der Kontaktfläche des Indenters. Der Elastizitätsmodul E der gemessenen Probe wird über Gleichung 5.13 bestimmt

$$E = (1 - \nu_s^2) \left[\frac{2}{S} \sqrt{\frac{A_c}{\pi}} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \right]^{-1}. \quad (5.13)$$

Der Index i steht dabei für die Kennwerte des Indenters und der Index s für die Kennwerte des Substrates. Neben dem E-Modul kann gleichzeitig bei diesem Experiment die Härte bestimmt werden [218]. Die Härte H ist definiert als Verhältnis der maximalen Last P_{max} zu der Kontaktfläche A_c

$$H = \frac{P_{max}}{A_c}. \quad (5.14)$$

Für jede Probe wird die Nanoindentierungs-Messung 25 mal an unterschiedlichen Stellen auf der Probe wiederholt, um eine statistische Auswertung durchzuführen. Bei der Messung der AlN- und Si_xN_y-Dünnschichten wurde jeweils ein Belastungs-/Entlastungs-Zyklus bei Raumtemperatur bis zu einer definierten Eindringtiefe aufgenommen. Nach Erreichen der maximalen Eindringtiefe wurde die Last für 10 s konstant gehalten und anschließend um 90 % reduziert mit der gleichen Rate wie bei der Eindringung. Der Indenter wird an dieser Position für 75 s mit konstanter Last gehalten und anschließend vollständig von der Probe entfernt und zu einem neuen Messpunkt bewegt. Der E-Modul und die Härte wurden für eine AlN- und Si_xN_y-Einzelschicht bestimmt. Dafür wurde eine 500 nm dicke AlN-Schicht auf Si(100) und eine 500 nm dicke Si_xN_y-Schicht auf Si(100) an jeweils 25 Messpunkten mit einer maximalen Last von 300 mN vermessen.

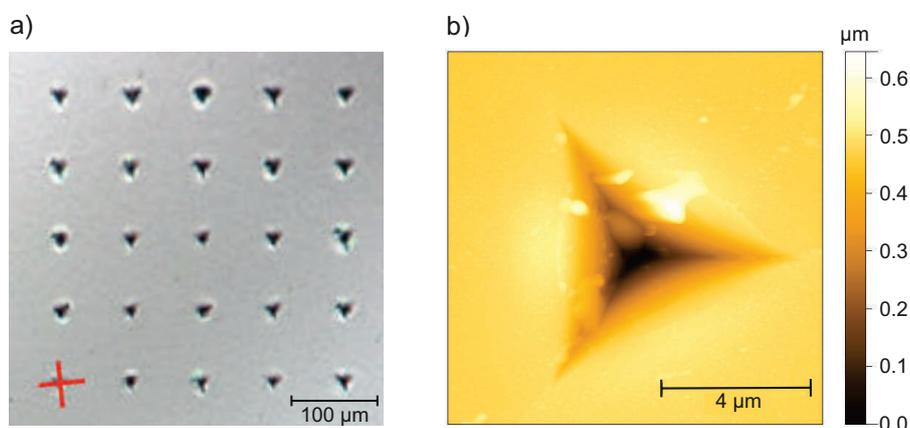


Abbildung 5.5: a) Mikroskopbild der AlN-Oberfläche nach der Nanoindentierung an jeweils 25 Messpunkten und b) AFM-Aufnahme der AlN-Oberfläche nach dem Eindringversuch mit einem Berkovich-Indenter

In Abbildung 5.5 ist ein Mikroskopbild und eine AFM-Aufnahme der AlN-Oberfläche nach der Nanoindentierung mit einem Berkovich-Indenter dargestellt. Die Eindringtiefe betrug bei der AlN- sowie bei der Si_xN_y-Schicht 1200 nm, wobei zur Auswertung und Darstellung der Messergebnisse eine Eindringtiefe bis 600 nm betrachtet wurde. Der E-Modul und die Härte wurden anschließend für die AlN- und Si_xN_y-Dünnschichten für die 25 Messreihen gemittelt und sind in Abbildung 5.6 dargestellt.

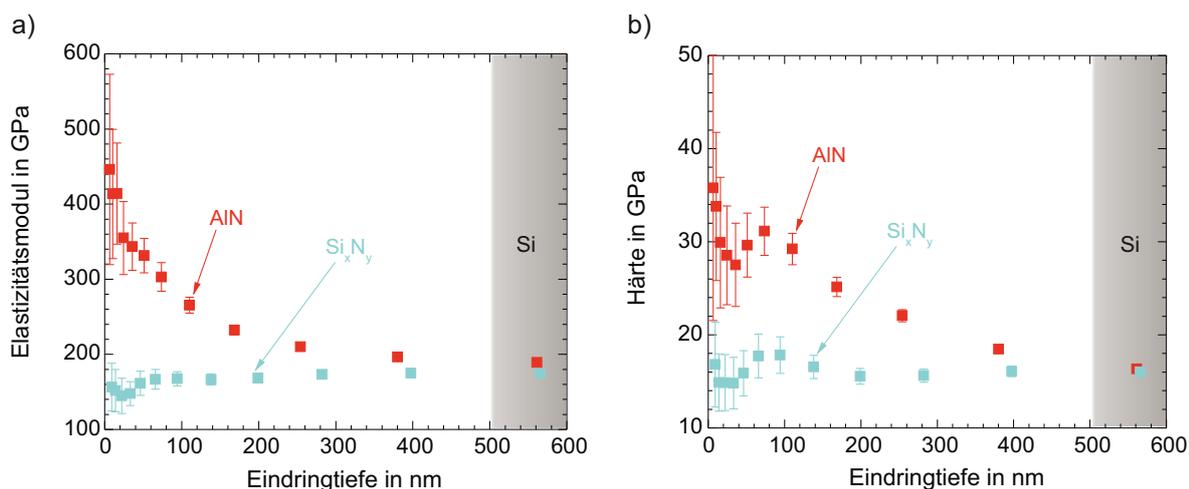


Abbildung 5.6: a) E-Modul und b) Härte einer 500 nm dicken AlN- (rot) und Si_xN_y-Einzelschicht (türkis) auf Si(100) in Abhängigkeit der Eindringtiefe des Nanoindenters. Die dargestellten Mittelwerte wurden aus 25 Messreihen mittels Nanoindentierung ermittelt.

Für die Messwerte des E-Moduls und der Härte nahe der Oberfläche der AlN- und Si_xN_y-Dünnschicht sind große Abweichungen der Messergebnisse zu erkennen. Dies liegt zum einen an der Rauheit der Proben und zum anderen an der Verwendung einer abgerundeten Berkovich-Spitze, welche die Messergebnisse für kleine Eindringtiefen verfälschen. Darüber hinaus werden die Werte für höhere Eindringtiefen durch das Si-Substrat ($E_{Si} = 130$ GPa) beeinflusst. Aus diesem Grund werden für die Berechnung des gemittelten E-Moduls und der Härte der Einzelschichten nur Messwerte bei einer Eindringtiefe von 40 nm bis 90 nm berücksichtigt. Der gemittelte E-Modul bzw. die gemittelte Härte einer 500 nm dünnen AlN-Schicht betragen bei Raumtemperatur 326 ± 21 GPa bzw. 29 ± 2 GPa (2957 ± 204 kg/mm²). Für eine Si_xN_y-Schicht mit einer Schichtdicke von 500 nm ergeben sich der gemittelte E-Modul bzw. die gemittelte Härte zu 165 ± 3 GPa bzw. 17 ± 1 GPa (1733 ± 102 kg/mm²). Die ermittelten Elastizitätsmodulen und die Härte der Einzelschichten stimmen gut mit den Literaturwerten in Tabelle 3.1 überein.

Neben dem Verfahren der Nanoindentierung wurde im Rahmen dieser Arbeit der Bulge-Test zur Charakterisierung der elastischen Eigenschaften von Dünnschichten verwendet. Für die Bulge-Test-Experimente werden kreisrunde Dünnschichtmembranen benötigt, welche mit dem Substrat fest verbunden sind. Unterhalb der eingespannten Membran wird ein Differenzdruck angelegt, wodurch die Membran ausgewölbt wird. Anschließend wird der Differenzdruck kontinuierlich erhöht und die Auslenkung der Membran in Abhängigkeit von dem angelegten Differenzdruck aufgenommen. Aus dieser Abhängigkeit lassen sich der biaxiale Elastizitätsmodul $E/(1-\nu)$ und die lokale intrinsische Schichtspannung σ_0 der Dünnschicht bestimmen. In Abbildung 5.7a ist der Bulge-Test schematisch dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen Druckbelastung und Auslenkung für kreisrunde Membranen kann mit Gleichung 5.15 beschrieben werden. Die Auslenkung der Membran z muss dabei deutlich kleiner sein als der Membranradius r [220–222].

$$\Delta p = \frac{k_1 d_M}{r^2} \sigma_0 z + \frac{k_2 f(\nu) d_M}{r^4} \frac{E}{1-\nu} z^3 = Az + Bz^3. \quad (5.15)$$

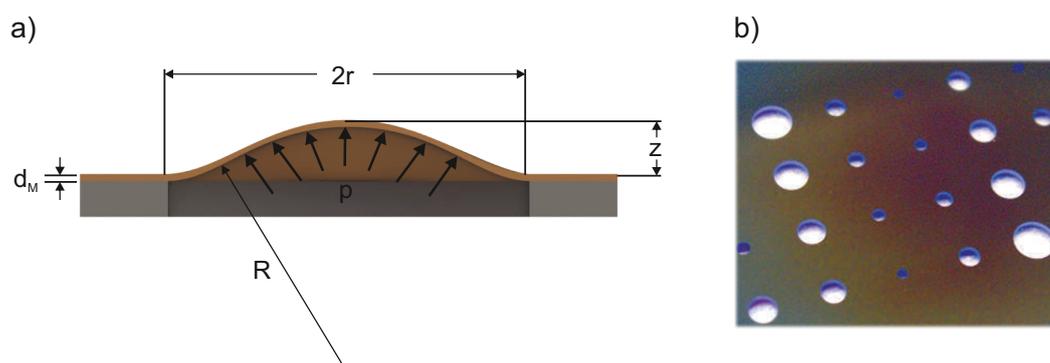


Abbildung 5.7: a) Darstellung der Membranauslenkung bei dem Bulge-Test-Experiment und b) Foto von Dünnschichtmembranen mit einem Durchmesser von 0,5 mm bis 3 mm zur Charakterisierung der elastischen Eigenschaften mittels Bulge-Test-Experiment

Hierbei sind Δp der angelegte Differenzdruck, d_M die Membrandicke, r der Radius, E und ν das Elastizitätsmodul bzw. die Poissonzahl der Membran und k_1 , k_2 und $f(\nu)$ geometrische Koeffizienten. Für kreisrunde Membranen ergeben sich die geometrischen Koeffizienten zu $k_1 = 4$, $k_2 = 8/3$ und $f(\nu) = 1$ [223]. Mit dieser Gleichung kann sowohl der E-Modul in Verknüpfung mit der Poissonzahl als auch die lokale Schichtspannung ermittelt werden. Allerdings kann die Eigenspannung nur für zugverspannte Membranen bestimmt werden, da die Bildung von Falten bei druckverspannten Membranen eine Relaxation der Membran verursacht. Darüber hinaus muss die Membran eine hohe Steifigkeit aufweisen, um den hohen Druckbelastungen standzuhalten. Mit dem Bulge-Test-Verfahren wird der E-Modul einer 500 nm dünnen AlN-Membran sowie einer unimorphen 1 μm dicken AlN/Si_xN_y-Membran bestimmt. Dafür wurden zwei 500 nm dicke AlN-Schichten auf 4"-Si-Substrate durch Magnetronspütern aufgebracht und zusätzlich auf einem AlN/Si-Substrat eine Si_xN_y-Schicht mit einer Schichtdicke von 500 nm mittels PECVD abgeschieden. Anschließend wurden kreisrunde Öffnungen mit einem Durchmesser von 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm mittels reaktiven Iontiefenätzen (DRIE, engl.: *deep reactive ion etching*) [224] in die Si-Wafer geätzt, um freistehende Membranen zu erhalten (Abbildung 5.7b). Eine detaillierte Beschreibung des reaktiven Ionenätzens folgt in Kapitel 5.5. Vor der Bulge-Test-Messung wurden die Wafer vereinzelt, so dass jeder Chip mit einer Größe von 12 × 12 mm² eine kreisrunde AlN- oder AlN/Si_xN_y-Membran mit einem Durchmesser zwischen 0,5 - 2 mm enthält. Der Messaufbau für die Bulge-Test-Experimente ist in Abbildung 5.8 schematisch dargestellt.

Der Chip mit der unimorphen AlN- oder AlN/Si_xN_y-Membran wird über eine kleine Öffnung in einem Aluminiumblock platziert und von oben mit einem weiterem Aluminiumblock eingespannt, der über Schrauben mit dem unteren Block verbunden ist. Zur Abdichtung wurde unter den Chip eine dünne Silikonplatte, welche ebenfalls unterhalb der Membran eine Öffnung enthält, gelegt. Die Oberfläche der Dünnschichtmembran wird mit Hilfe eines Weißlichtinterferometers (WLI) vermessen. Eine detaillierte Beschreibung des WLI-Messprinzips kann [225] entnommen werden. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurde das Weißlichtinterferometer *ContourGT* der Firma Bruker verwendet. Für die Abbildung der Oberfläche stehen zwei unterschiedliche Messmodi zur Verfügung, der PSI-Modus (engl.: *Phase-Shifting-Interferometry*) für glatte und der VSI-Modus (engl.: *Vertical-Scanning-Interferometry*) für raue Oberflächen. Die Oberflächen der Membranen wurden in dieser Arbeit alle im VSI-Modus vermessen. Die Auswertung erfolgte dabei mit

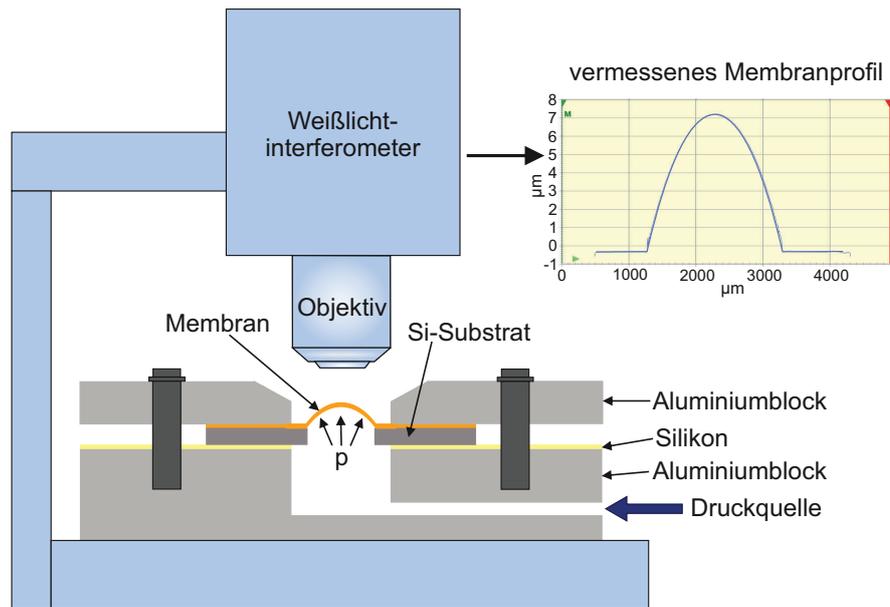


Abbildung 5.8: Schematische Darstellung des Bulge-Test-Messaufbaus. Der Druck unterhalb der Membran wird mit einem Nadelventil gesteuert. Die sphärische Membranauslenkung wird für unterschiedliche Druckwerte mit einem Weißlichtinterferometer vermessen und ausgewertet.

der Analysesoftware Vision 64TM. Die Vorteile dieser optischen Messmethode sind die berührungslose Abbildung der Oberfläche der Membran und das hohe Auflösungsvermögen. Jedoch kann die Reflexion von stark geneigten Flächen nicht mehr erfasst werden. Mithilfe von Stickstoff wurde der Gasdruck kontinuierlich über ein Nadelventil erhöht und die Auslenkung der Membran im Membranzentrum aufgenommen. Mit diesem Messaufbau konnte ein maximaler Differenzdruckwert von 100 kPa erzeugt werden. Der Druckwert wird über ein integriertes Druckmessgerät erfasst.

In Abbildung 5.9 ist die Druck-Auslenkungskurve einer 500 nm dünnen AlN-Membran mit einem Durchmesser von 1,5 mm exemplarisch dargestellt. Bei der Vermessung dieser Membran war eine maximale Druckbelastung bis zu 70 kPa möglich, wodurch der E-Modul mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden konnte. Die aufgenommene Messkurve kann durch Gleichung 5.15 angenähert werden. Für kleine Drücke ist die Messkurve linear und kann mit dem ersten Teil der Gleichung (Az) beschrieben werden. Die eingezeichnete gestrichelte Linie (i) stellt die Asymptote bei niedrigen Drücken dar. Bei höheren Drücken kann der Kurvenanstieg mit dem zweiten Teil der Gleichung (Bz^3) angenähert werden, welcher mit der eingezeichneten Asymptote (ii) dargestellt ist. Durch eine Beschreibung der Messkurve mit einer kubischen Polynomfunktion der Form $y = Ax + Bx^3$ können die Koeffizienten A und B und somit die Eigenspannung σ_0 und der E-Modul der AlN-Membran bestimmt werden. Die Eigenspannung und der Elastizitätsmodul der 500 nm dünnen AlN-Schicht konnte zu 260 ± 2 MPa und 350 ± 5 GPa ermittelt werden mit $\nu(\text{AlN}) = 0,24$. Darüber hinaus wurde die AlN/Si_xN_y-Membran mit dem Bulge-Test vermessen. Die Eigenspannung der Heterostruktur konnte nicht bestimmt werden, da die Membran druckverspannt war. Der kombinierte E-Modul der AlN/Si_xN_y-Heterostruktur konnte zu 176 ± 2 GPa bestimmt werden mit $\nu(\text{Si}_x\text{N}_y) = 0,23$. Die ermittelten E-Modulen sind vergleichbar mit dem berechneten Werten aus der Nanoindentierungs-Messung. Beide Methoden eignen sich dementsprechend zur Analyse von elastischen Eigenschaften von Dünnschichten, besonders wenn eine lokale Bestimmung des E-Moduls oder der Spannung

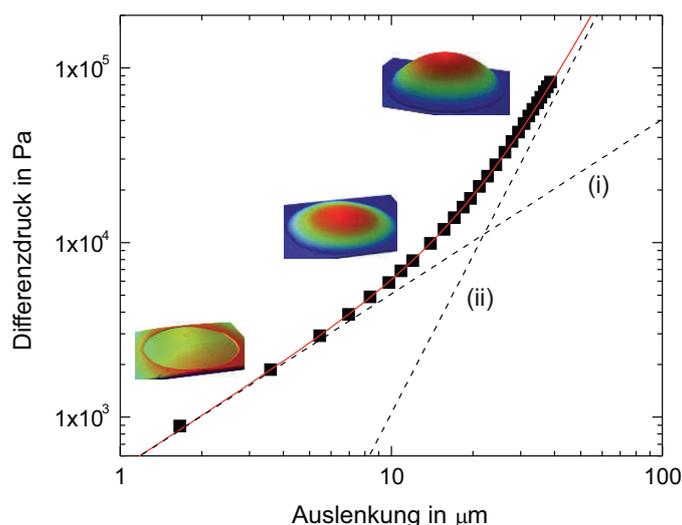


Abbildung 5.9: Druck-Auslenkungs-Kurve einer AlN-Membran mit einem Durchmesser von 1,5 mm und einer Schichtdicke von 500 nm. Die schwarzen Punkte repräsentieren die Messkurve und die rote Linie die Fitkurve nach Gleichung 5.15. Die gestrichelten Linie (i) und (ii) stellen die Asymptoten bei niedrigen und hohen Drücken dar. Zusätzlich sind die WLI-Aufnahmen der Membranoberfläche bei steigendem Differenzdruck dargestellt.

gewünscht ist. Der Bulge-Test wurde an den gleichen Membranen mehrfach wiederholt (5 Messzyklen), um die Langzeitbeanspruchung der AlN-Membran und der unimorphen Membran zu überprüfen. Die Auswertung jedes Messzyklus lieferte dabei die gleichen Werte für die E-Modulen. Die Membranen aus AlN und Si_xN_y weisen demnach kein Kriechverhalten auf und sind langzeitstabil. Damit bieten sie einen großen Vorteil gegenüber den PDMS-Membranen, die ein Kriechverhalten aufweisen [97, 98]. Die ermittelten elastischen und piezoelektrischen Eigenschaften der AlN- und Si_xN_y- Einzel und Heterostrukturen sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3: Ermittelte elastische und piezoelektrische Eigenschaften der AlN- und Si_xN_y-Einzel- und Heterostrukturen

Materialeigenschaften	AlN	Si _x N _y	AlN/Si _x N _y
d in nm	500	500	1000
d_{33} in pm/V	-3 – -5	-	-
E in GPa (Nanoindentierung)	326 ± 21	165 ± 3	-
Härte in GPa (Nanoindentierung)	29 ± 2	17 ± 1	-
Härte in kg/mm ² (Nanoindentierung)	2957 ± 204	1733 ± 102	-
E in GPa (Bulge-Test)	350 ± 5	-	176 ± 2

Somit konnte gezeigt werden, dass die unimorphen AlN/Si_xN_y-Membranen eine gute Elastizität und Flexibilität aufweisen und sich daher für die Herstellung von mechanisch-stabilen verstimmbaren Membran-basierten Mikrolinsen mit einem Durchmesser $d_L \leq 2$ mm eignen.

5.4 Optische Eigenschaften der Dünnschichten

Neben den elastischen und piezoelektrischen Eigenschaften ist eine gute optische Qualität der verwendeten Materialien von großer Wichtigkeit. Die Materialien für die verstimmbare Mikrolinse müssen, gemäß den Anforderungen in Kapitel 3.1, eine hohe optische Transparenz im sichtbaren Spektralbereich aufweisen. Aus diesem Grund wird die optische Transmission der unimorphen $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Membran und der ITO-Schicht, die als Elektrodenmaterial integriert wird, untersucht. Die Transmissionsspektren wurden mit einem UV-VIS-IR-Spektrometer *Lambda 950* der Firma Perkin Elmer im Wellenlängenbereich von 200 bis 800 nm aufgenommen. Die Schrittweite des Monochromators betrug 1 nm. Das monochromatische Licht wird dabei durch eine Deuteriumlampe für den UV-Bereich von 200 bis 360 nm und durch eine Wolfram-Halogenlampe für den sichtbaren Bereich von 360 bis 780 nm erzeugt.

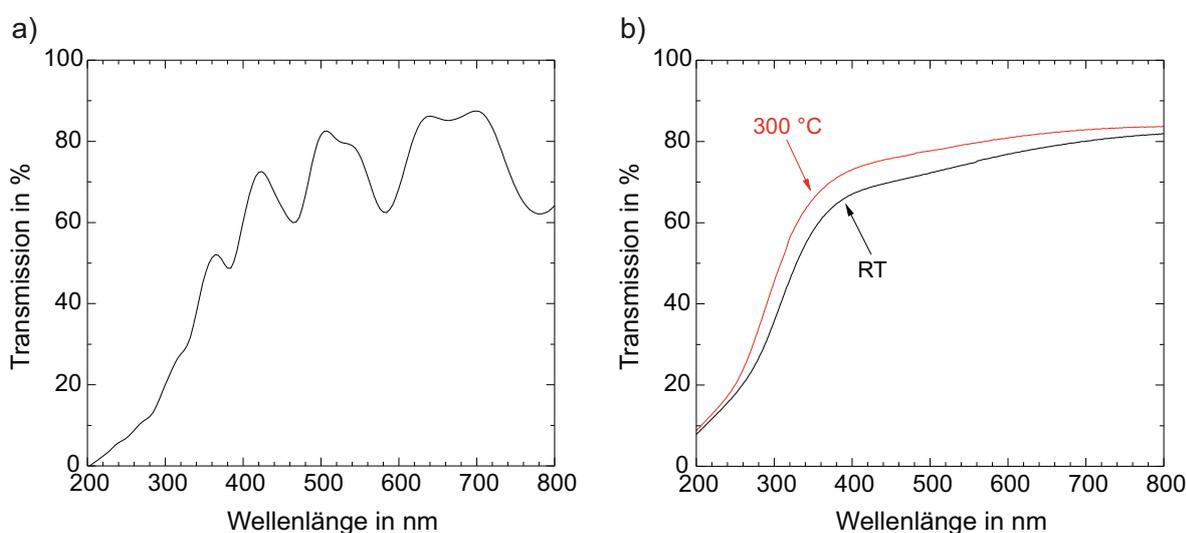


Abbildung 5.10: Optische Transmission im sichtbaren Spektralbereich einer a) 1 μm -dicken unimorphen $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Membran und b) einer 50 nm dünnen ITO-Schicht auf einem Saphir-Substrat nach Abscheidung (schwarz) und Temperung bei 300 $^{\circ}\text{C}$ für 5 Minuten in einer O_2 -Atmosphäre (rot)

Abbildung 5.10a zeigt das Transmissionsspektrum der unimorphen 1 μm dicken $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Membran. Diese Struktur weist im gesamten sichtbaren Spektralbereich aufgrund der hohen Bandlücken von AlN und Si_xN_y eine Transmission von 60 - 80 % auf. Aufgrund von Mehrfachreflexionen an den Schichtgrenzflächen treten Interferenzeffekte auf [226]. Die Ausbreitung des Lichts an einer planparallelen dünnen Schicht ($d \approx \lambda$) mit Luft als Umgebungsmedium ist in Abbildung 5.11 schematisch dargestellt.

Die eintreffende Lichtwelle wird an der ersten Grenzfläche n_1/n_2 am Punkt A am optisch dichteren Medium teilweise reflektiert und erfährt hierbei einen Phasensprung von π (R_1). Ein Teil des einfallenden Lichts dringt in die optisch dichtere Dünnschicht ein und wird dabei unter dem Winkel Θ_2 zum Einfallslot hin gebrochen (T_1). An der Grenzfläche n_2/n_1 am Punkt B wird ein Teil der transmittierten Teilwelle reflektiert (T_2). Da das Medium 3 mit n_1 optisch dünner ist im Vergleich zur Dünnschicht mit n_2 , kommt es dabei nicht zum Phasensprung. Der andere Teil der transmittierten Teilwelle T_1 tritt hinter der Grenzfläche in das Medium 3 ein (TT_1). Wird die reflektierte Teilwelle T_2 am Punkt C an der ersten Grenzfläche transmittiert, interferieren beide Lichtwellen R_1 und R_2 miteinander. Ein Teil der

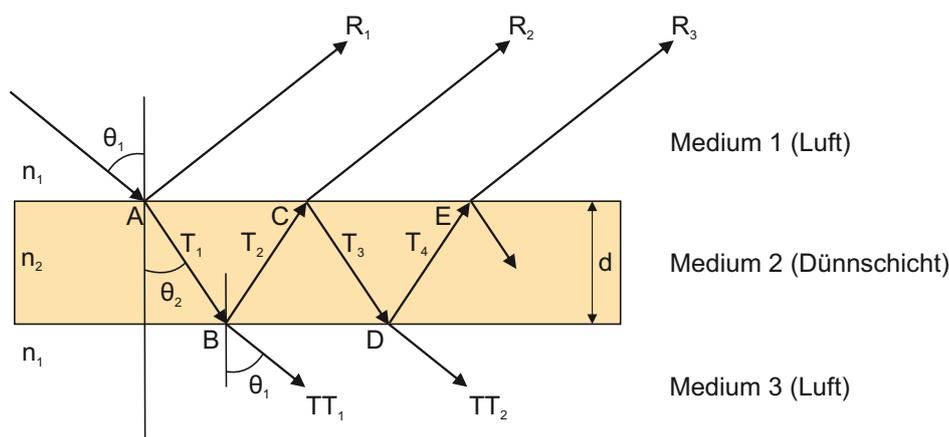


Abbildung 5.11: Schematische Darstellung der Ausbreitung des Lichts an einer dünnen Schicht mit $n_2 > n_1$

Teilwelle T_2 wird am Punkt C reflektiert. An weiteren Punkten treten weitere Reflexionen auf, die wiederum zu erneuten Reflexionen und Interferenzen führen [226].

Für die $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse sollen jeweils 50 nm ITO als obere bzw. untere Elektrode zur Ansteuerung der piezoelektrischen AlN-Schicht eingesetzt werden (siehe Kapitel 5.1). Eine hohe Transmission der Elektrode ist dabei essentiell. Aus diesem Grund wurde zunächst eine 50 nm dünne ITO-Schicht durch Magnetronspütern unter Verwendung der in Tabelle 5.1 aufgeführten Prozessparametern auf einem Saphirsubstrat abgeschieden und getempert, um die optische Transmission von ITO zu bestimmen. Die Transmissionsspektren nach der Abscheidung (schwarze Kurve) und nach der Temperung bei 300 °C (rote Kurve) sind in Abbildung 5.10b dargestellt. Die optische Transmission der ITO-Schicht konnte durch die Temperung (Auskristallisierung) erhöht werden und beträgt im sichtbaren Spektralbereich zwischen 70 - 80 %. Folglich ist die Transparenz von AlN, Si_xN_y und ITO, gemäß den Anforderungen an die verstimmbare Mikrolinse (siehe Kapitel 3.1, Anforderung 5), hoch genug, um diese Materialien für die Herstellung von verstimmbaren Mikrolinsen zu verwenden.

5.5 Mikrofabrikation und AVT

Für die Herstellung der verstimmbaren $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen waren über 50 Prozessschritte notwendig. Die verstimmbaren Mikrolinsen wurden mit mikrotechnologischen Verfahren hergestellt [227]. Die Chipgröße von $12 \times 12 \text{ mm}^2$ ermöglicht die gleichzeitige Herstellung von 43 Bauelementen auf einem 4"-Wafer. Die einzelnen Chips wurden während der Frontseitenprozessierung zusätzlich beschriftet, um eine spätere Zuordnung der einzelnen Bauelemente zu gewährleisten. Da die Strukturgrößen der Mikrolinsen im Mikro- bis Millimeterbereich liegen, konnte die Herstellung mit konventionellen Methoden der optischen Lithographie erfolgen. Die Herstellung der Linsen lässt sich in vier unterschiedliche Ebenen unterteilen:

1. Ebene: Mesa-Ätzung
2. Ebene: Kontaktmetallisierung
3. Ebene: Strukturierung der oberen Elektrode
4. Ebene: Membranherstellung

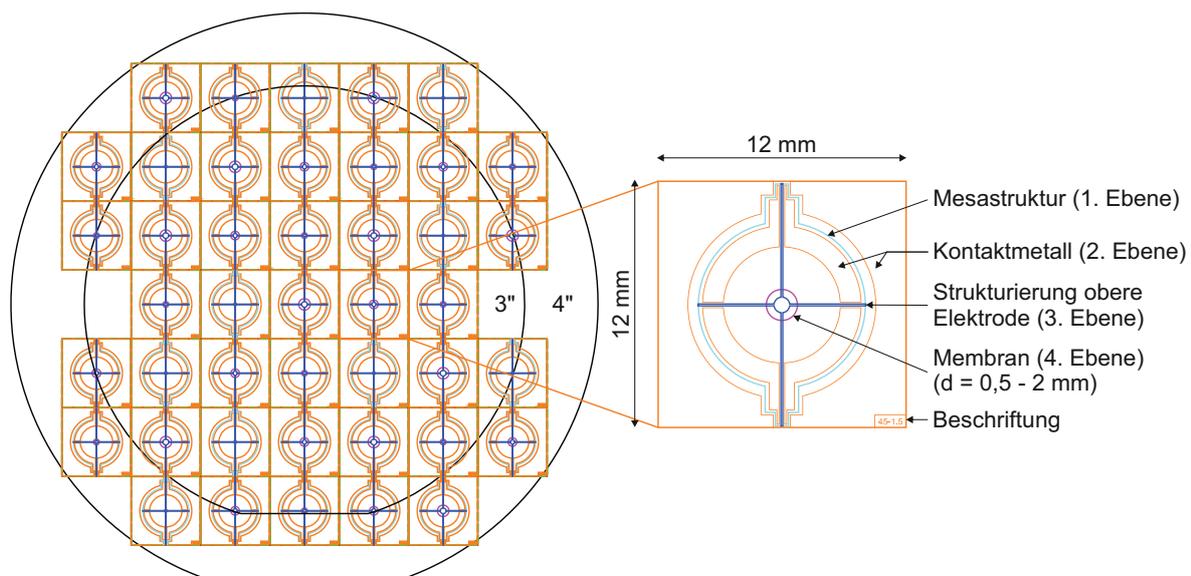


Abbildung 5.12: Maskenlayout mit vier verschiedenen Maskenebenen für 3"- bzw. 4"-Wafer zur Herstellung von verstimmbaren Mikrolinsen

Abbildung 5.12 zeigt das Maskenlayout mit den vier verschiedenen Ebenen für 3"- bzw. 4"-Wafer zur Herstellung von verstimmbaren Mikrolinsen. Die Frontseitenbearbeitung, die 1. - 3. Ebene, wurde im Reinraum des Fraunhofer IAF und der Rückseitenprozess, die 4. Ebene, im Reinraum des Instituts für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg durchgeführt.

Zu Beginn wurden, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, eine 500 nm dicke AlN -Schicht, eine 50 nm dünne ITO -Schicht und eine 500 nm dicke Si_xN_y -Schicht auf einem Si -Substrat abgeschieden (Abbildung 5.13a). Diese Mehrlagenstruktur bildete die Grundlage für die Prozessierung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen. In den folgenden Abschnitten werden die Herstellungsabläufe detailliert beschrieben.

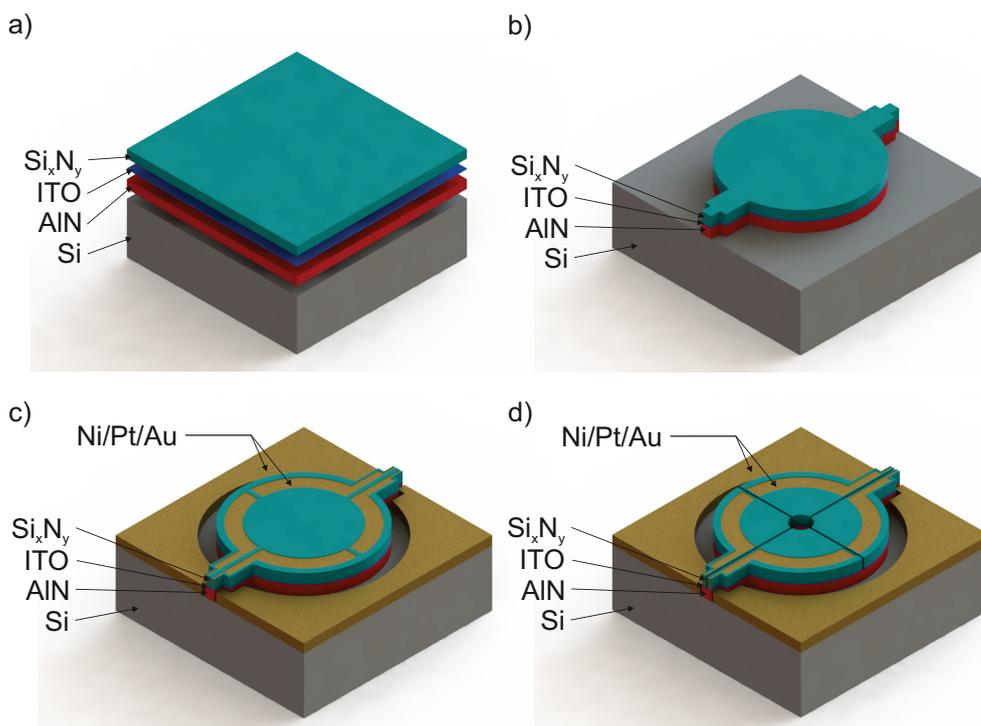


Abbildung 5.13: Herstellung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse: a) Abscheiden der AlN -, ITO - und Si_xN_y -Schichten, b) Mesa-Ätzung zum Freilegen der unteren Elektrode, c) Kontaktmetallisierung der oberen und unteren ITO -Anregungselektrode und d) Strukturierung der oberen Si_xN_y -Schicht und der ITO -Elektrode. Die Si_xN_y -Schicht ist hierbei in türkis, die AlN -Schicht in rot und die ITO -Elektroden in blau dargestellt.

1. Ebene: Mesa-Ätzung

In der ersten Ebene wurde die Mesa-Struktur¹ definiert und somit das Si -Substrat freigelegt. Die Geometrie der Mesa-Struktur wurde mit Hilfe der Kontaktlithographie definiert. Dafür wurde zu Beginn der Photolack AZ 5214 ganzflächig aufgeschleudert, als Positivlack belichtet und entwickelt. Nach der Temperung des Photolackes wurde die 500 nm dicke Si_xN_y -Schicht durch reaktives Ionenätzen (RIE, engl.: *reactive ion etching*) mit Schwefelhexafluorid (SF_6) geätzt. Für die Ätzung der Si_xN_y -Schicht wurde eine Ätzanlage der Firma Oxford Instruments mit einem induktiv gekoppelten Plasma (ICP, engl.: *inductively coupled plasma*) verwendet. Anschließend wurde der restliche Photolack mithilfe von Dimethylsulfoxid (DMSO), einem organischen Lösemittel, entfernt. Die ITO -Elektrode und die AlN -Schicht wurden im Anschluss nasschemisch geätzt. Die Si_xN_y -Schicht diente dabei als Ätzmaske. Die 50 nm dünne ITO -Schicht wurde mithilfe einer Salzsäurelösung ($\text{HCl}/\text{H}_2\text{O} = 1:1$) bei Raumtemperatur geätzt. Abschließend wurde die 500 nm dicke AlN -Schicht mit einer wässrigen Ammoniumhydroxid-Lösung ($\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:10$) bei $\approx 50^\circ\text{C}$ geätzt. Abbildung 5.13b zeigt den Chip nach Beendigung der ersten Ebene.

¹Als Mesa werden in der Mikrotechnologie Erhebungen mit steilen Flanken bezeichnet, deren Umgebung weggeätzt wurde.

2. Ebene: Kontaktmetallisierung

In der 2. Ebene folgte die Kontaktmetallisierung mithilfe des Lift-Off-Verfahrens. Durch die Kontaktverstärkungen sollen die ITO-Elektroden elektrisch kontaktiert werden. Für die obere ITO-Elektrode wurden die Kontaktmetalle direkt auf die ITO-Schicht aufgebracht. Die untere ITO-Elektrode wird über das Si-Substrat kontaktiert. Aus diesem Grund wurden die Kontaktmetalle für die untere Elektrode auf die freigelegte Si-Fläche aufgebracht. Hierfür wurde AZ 5214 ganzflächig aufgebracht, als Negativlack belichtet und entwickelt. Im nächsten Schritt wurde die Si_xN_y -Schicht mittels RIE geätzt, um die obere ITO-Elektrode freizulegen. Anschließend konnte die eigentliche Kontaktmetallisierung folgen. Hierfür wurden 50 nm Nickel (Ni) als Haftvermittler sowie 150 nm Platin (Pt) und 200 nm Gold (Au) durch Elektronenstrahlverdampfung ganzflächig aufgebracht. Durch das Entfernen des Photolacks mittels DMSO wurde abschließend die auf dem Lack kondensierte Metallschicht mit abgelöst und die geschützten Stellen somit freigelegt (Abbildung 5.13c).

3. Ebene: Strukturierung der oberen Elektrode

Die letzte Ebene des Frontseitenprozesses beinhaltet die Strukturierung der oberen ITO-Elektrode (Abbildung 5.13d). Zur Realisierung der vier unabhängigen Segmente wurden Gräben mit einer Breite von 90 μm in die ITO-Schicht geätzt. Zusätzlich wurde zur optimierten Anregung des AlN-Aktors eine kreisrunde Öffnung in die ITO-Elektrode geätzt, so dass die Ringelektrode nur 40 % der späteren Membranoberfläche bedeckt. Hierfür wurde AZ 5214 ganzflächig aufgebracht, als Positivlack belichtet und entwickelt. Um die vergrabene ITO-Elektrode zu strukturieren, musste die Si_xN_y -Schicht ebenfalls mittels ICP mit SF_6 geätzt werden. Anschließend konnte die ITO-Elektrode mit einer Salzsäurelösung ($\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:1$) nasschemisch geätzt werden. Im letzten Schritt des Frontseitenprozesses wurde der Photolack mittels DMSO entfernt.

4. Ebene: Membranherstellung und Aufbringen der Rückelektrode

In der letzten Ebene, dem Rückseitenprozess, wurde die Membran durch das tiefe reaktive Ionenätzen (DRIE), dem sogenannten Bosch-Prozess, hergestellt. Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein anisotropes Trockenätzverfahren zur Herstellung von Mikrostrukturen in Silizium mit einem großen Aspektverhältnis [228], welches in den 1990er Jahren von F. Lärmer und A. Schilp entwickelt wurde [224]. Zu Beginn dieses Prozesses wurde die Vorderseite des Wafers mit einem Schutzlack bedeckt. Anschließend wurde der Positivlack AZ 9260 ganzflächig auf die Rückseite des Siliziumwafers aufgebracht. Um dem Ätzprozess standzuhalten, wurde für die Strukturierung des Si-Substrates eine Photolackdicke von 24 μm verwendet. Durch die Rückseitenlithographie wurde die Membranform definiert. Die Maske enthält neben den kreisrunden Öffnungen für die Membranen dünne Gräben, welche die Chipgröße des Bauelementes definieren. Durch die zusätzliche Ätzung von Gräben in das Si-Substrat wurde die spätere Vereinzelung der Chips ohne zusätzlichen Aufwand ermöglicht. Nach der Strukturierung und Temperung des Photolackes erfolgte der Ätzprozess des Si-Substrates in einer ICP-Ätzanlage *Multiplex* der Firma Surface Technology Systems. Abschließend wurde der verbleibende Photolack mithilfe von DMSO entfernt. Bei dieser Ebene wurden Membranen mit einem Durchmesser von 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm hergestellt (Abbildung 5.14a). Eine detaillierte Zusammenfassung der Prozessschritte zur Herstellung der AlN/ Si_xN_y -Mikrolinse befindet sich im Anhang in Kapitel A.1.

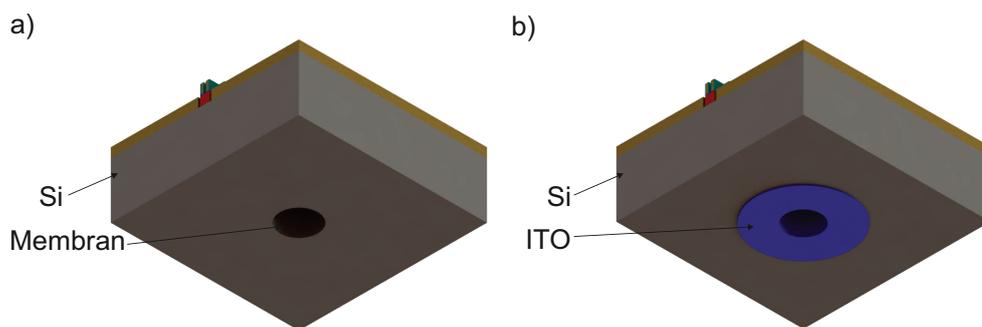


Abbildung 5.14: a) Herstellung einer kreisrunden Membran mit einem Durchmesser von 0,5 mm bis 2 mm durch reaktives Ionentiefenätzen des Si-Substrates und b) Aufbringen der ITO-Rückelektrode

Nach der Beendigung des Frontseiten- und Rückseitenprozesses muss die ITO-Rückelektrode nachträglich aufgebracht werden. Vor der ITO-Abscheidung wurde der Wafer mit der zu beschichtenden Seite auf eine Si-Maske gelegt, die kreisrunde Öffnungen mit einem Durchmesser von 4 mm enthält, um eine Vereinzelung der Chips bei der Abscheidung der ITO-Elektrode zu verhindern. Die 50 nm dünne ITO-Schicht wurde mithilfe einer Hochfrequenz-Magnetronsputteranlage auf die Rückseite des Si-Substrates abgeschieden (Abbildung 5.14b).

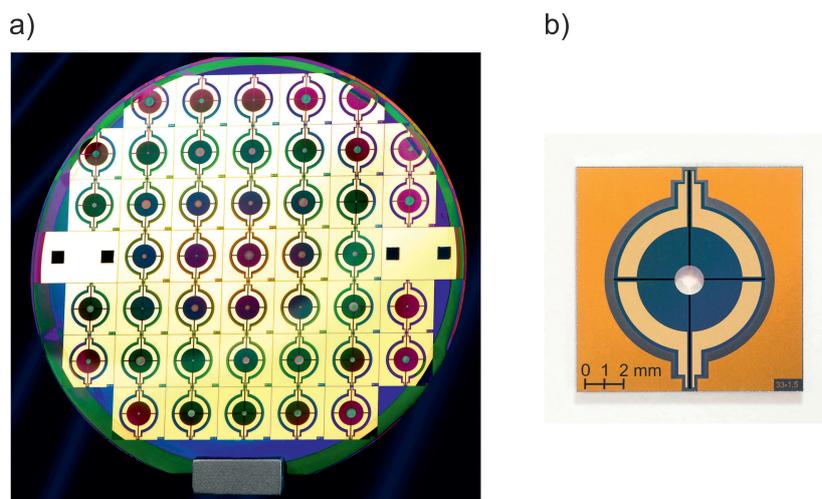


Abbildung 5.15: Foto eines a) prozessierten 4"-Wafers mit 4-Segment-Mikrolinsen und b) eines vereinzelt Chips mit einer Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1.5 mm [227]

Nach der erfolgten Prozessierung wurden die Wafer in einzelne Chips, welche jeweils ein Bauelement enthalten, vereinzelt. In Abbildung 5.15 ist ein Foto eines prozessierten 4"-Wafers mit 4-Segment-Mikrolinsen sowie ein $12 \times 12 \text{ mm}^2$ Chip mit einer $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1,5 mm nach der Vereinzelung dargestellt. Hierbei sind deutlich die 4 Sektoren zur asymmetrischen Auslenkung der Membran zu erkennen.

Für die elektro-mechanische und optische Charakterisierung der Linsen müssen diese elektrisch kontaktiert und in eine Messhalterung integriert werden. Dieser Aufbau muss sowohl mit Luft als auch mit Immersionsöl befüllbar sein und zudem in ein kommerzielles Mikrobank-System der Firma Linos integrierbar sein. Hierfür wurde im Rahmen dieser Arbeit

eine speziell für diese Anforderungen entwickelte Messhalterung entwickelt. Die Messhalterung setzt sich aus drei verschiedenen Komponenten zusammen, der Leiterplatte, der Flüssigkeitskammer und dem Verbindungsstück zur Integration in ein Mikrobank-System. Die einzelnen Komponenten sind in Abbildung 5.16 dargestellt.

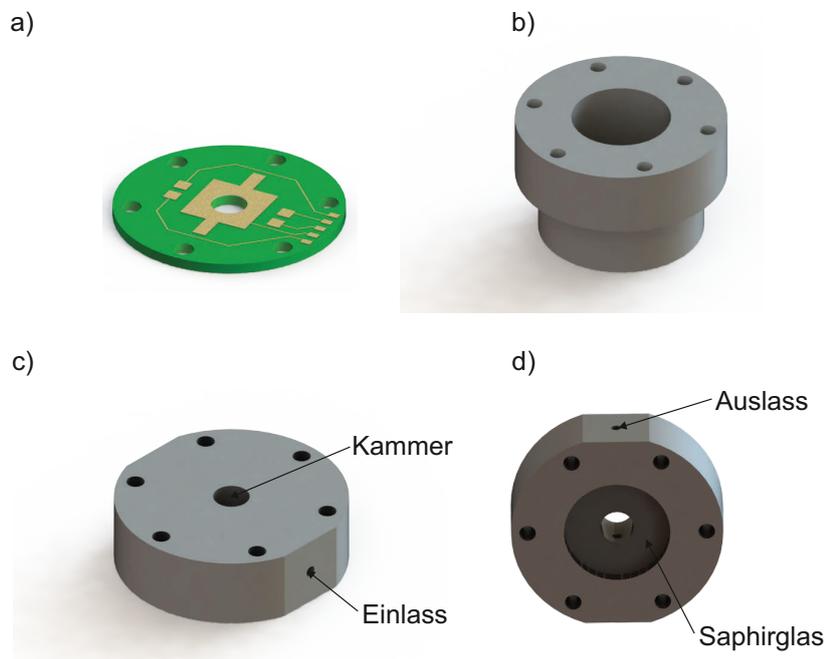


Abbildung 5.16: Schematische Darstellung der a) Leiterplatte, b) des Verbindungsstück sowie c) und d) der Flüssigkeitskammer

Die vereinzelt Linsenchips werden auf die Mitte der Leiterplatte geklebt und die einzelnen Sektoren und die untere Elektrode mittels Drahtbonden elektrisch kontaktiert. Die schematische Zeichnung der Leiterplatte ist in Abbildung 5.16a zu sehen. Zum Anschließen an eine Spannungsversorgung wird eine Steckerverbindung auf die fünf Kontaktpads am äußeren Rand der Platine gelötet. Die Flüssigkeitskammer (Abbildung 5.16c und d) wird aus Aluminium gefertigt und anschließend eloxiert. Die Kammer hat einen Durchmesser von 5 mm und eine Tiefe von 7 mm. Auf die obere Öffnung der Flüssigkeitskammer wird die Leiterplatte zusammen mit einer Silikondichtung befestigt. Auf der gegenüberliegenden Seite wird die Flüssigkeitskammer mit einem 3 mm dicken Saphirglas verschlossen. Saphirglas wird als Abdichtung gewählt, um Streueffekte und Absorptionsverluste zu vermeiden. Der optische Pfad verläuft somit durch das Saphirglas, die optische Flüssigkeit und die verstimmbare Mikrolinse. Zur Befüllung der Kammer mit Luft oder Öl befinden sich an zwei gegenüberliegenden Seitenflächen der Flüssigkeitskammer ein Zu- und Abfluss (Abbildung 5.16d). Am Ein- und Auslass der Flüssigkeitskammer wird jeweils ein Schlauchanschluss *NanoPort* der Firma IDEX Health & Science geklebt. Über ein Schlauchsystem kann sowohl Luft als auch Immersionsöl in die Kammer gepumpt werden und somit die plankonvexe Mikrolinse vorgewölbt werden. Zusätzlich wird ein Verbindungsstück aus eloxiertem Aluminium hergestellt, welches auf der einen Seite sechs Gewindebohrungen enthält (Abbildung 5.16b). Dadurch können die Leiterplatte, die Flüssigkeitskammer und das Verbindungsstück miteinander verschraubt werden. Die Abmessungen des unteren Teils des Verbindungsstückes wurde so gewählt, dass die Messhalterung in ein konventionelles Mikrobank-System integrierbar ist. Eine schematische Explosionsdarstellung der gesamten

Messhalterung ist in Abbildung 5.17a dargestellt. Abbildung 5.17b zeigt ein Foto des realen Mikrofluidikaufbaus mit einer integrierten verstimmbaren Linse.

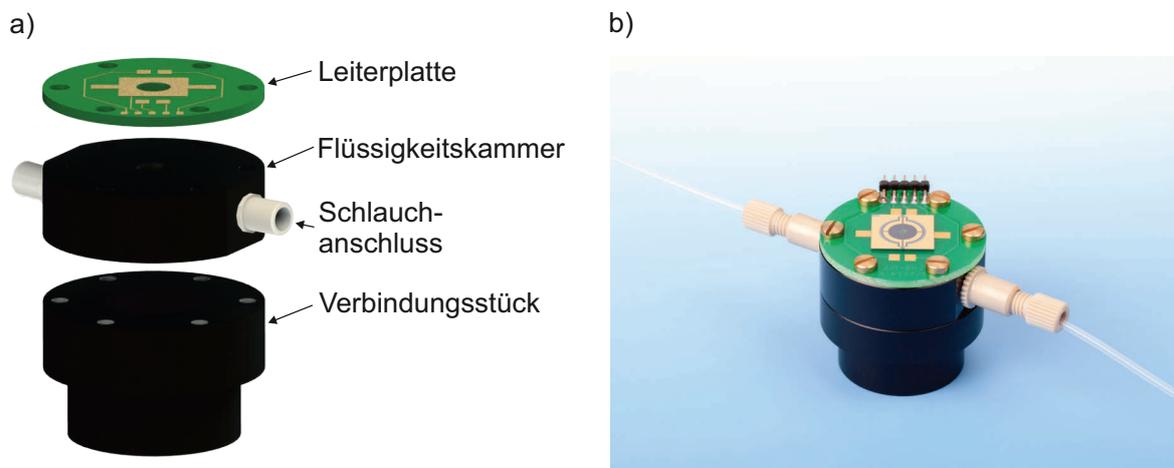


Abbildung 5.17: a) Schematische Explosionsdarstellung und b) Foto des gesamten Mikrofluidikaufbaus mit integrierter verstimmbarer Linse [5]

Zur elektro-mechanischen Charakterisierung der Mikrolinse wird Luft in die Kammer gepumpt. Für die optische Charakterisierung wird die Flüssigkeitskammer mit einem Immersionsöl der Firma AppliChem mit $n = 1,517$ bei Raumtemperatur befüllt.

5.6 Simulation der mechanischen Wirkung

Die elektromechanische Wirkung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse wurde im Rahmen dieser Arbeit mit dem kommerziellen Simulationsprogramm COMSOL Multiphysics 4.4 simuliert. Hierfür wurde das Zusatzpaket MEMS-Module verwendet. Mithilfe eines mechanischen Modells soll, bevor in Kapitel 5.7 die reale Wirkungsweise der Linse untersucht wird, die theoretische Änderung der Membranoberfläche und somit die theoretisch zu erwartende Auslenkung der Mikrolinse bestimmt werden. COMSOL Multiphysics ist ein Programm zur Simulation und Modellierung von physikalischen Prozessen, welche sich mathematisch unter Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen mit partiellen Differentialgleichungen beschreiben lassen. Diese Gleichungen werden in COMSOL Multiphysics mit der Methode der finiten Elemente gelöst. Darüber hinaus ermöglicht COMSOL Multiphysics die Kopplung verschiedener physikalischer Prozesse (Multiphysics), welche gleichzeitig gelöst werden können. Für eine detaillierte Beschreibung der Simulationssoftware sei auf [229] verwiesen. Die Ergebnisse dieser FEM-Analysen der Linsendeformation in COMSOL sollen die Ausgangsbasis einer Diskussion der in dieser Arbeit untersuchten verstimmbaren Mikrolinsen bilden.

Das in COMSOL Multiphysics erstellte Modell der Mikrolinse ist in Abbildung 5.18a dargestellt. Die COMSOL-Simulation wird exemplarisch an einer Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm dargestellt. Das Modell besteht aus einer ganzflächigen 500 nm dicken piezoelektrischen AlN -Schicht (in rot dargestellt), sowie aus vier strukturierten Sektoren (S1 - S4), welche aus einer 50 nm dünnen ITO-Elektrode und einer linear-elastischen 500 nm dicken Si_xN_y -Schicht bestehen. Die einzelnen Schichten sind in dem Modell aufgrund des sehr großen Aspektverhältnisses von Strukturbreite (1 mm) zu Schichtdicke ($1,1 \mu\text{m}$) nicht erkennbar. Das Modell wird durch ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem

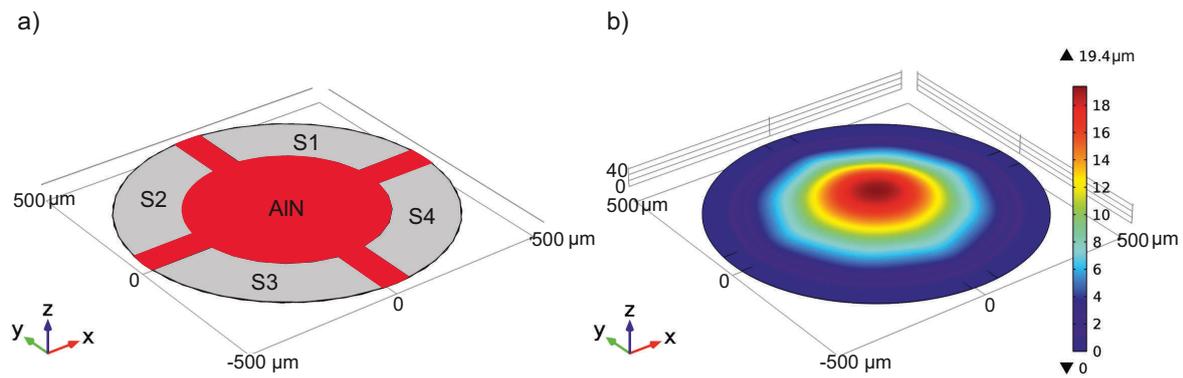


Abbildung 5.18: a) In COMSOL Multiphysics modellierte Geometrie der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse und b) Simulation der Membranauslenkung bei konstantem Druck ohne angelegte Spannung

beschrieben. Die Materialparameter, wie z. B. der piezoelektrische Koeffizient, der Elastizitätsmodul oder die Dichte der verwendeten Materialien, wurden den in Kapitel 4.4 und Kapitel 5.3 ermittelten Werten angepasst, um eine möglichst realistische Simulation zu gewährleisten. Zusätzlich wurden einige Randbedingungen im Modell vorgegeben. Zum einen sind die Seitenflächen fest eingespannt und zum anderen wird ein konstanter Druck auf die Unterseite der AIN-Schicht gegeben, um eine Vorauswölbung der Linsenmembran zu erreichen. Dabei wurde der Druck so eingestellt, dass die Vorauswölbung von $\approx 20 \mu\text{m}$ der realen Vorauswölbung durch Luft oder Immersionsöl bei der Vermessung der AIN/Si_xN_y-Linsen mit einem Durchmesser von 1 mm entspricht. Die Simulation der Membranauslenkung bei konstantem Druck ohne Anlegen einer Spannung ist in Abbildung 5.18b veranschaulicht. Um die Änderungen der Membranoberfläche und somit die Auslenkung besser zu veranschaulichen und exakt vermessen zu können, wurden zusätzlich zwei Querschnittsprofile durch die Mitte von zwei gegenüberliegenden Sektoren aufgezeichnet. Das Profil 1 stellt hierbei das Querschnittsprofil durch die Mitte der Sektoren 3 und 1 und das Profil 2 das Querschnittsprofil durch die Mitte der Sektoren 2 und 4 dar. Abbildung 5.19 zeigt die beiden Querschnittsprofile, welche bei einem konstanten Druck und ohne Anregung der Sektoren aufgenommen wurden.

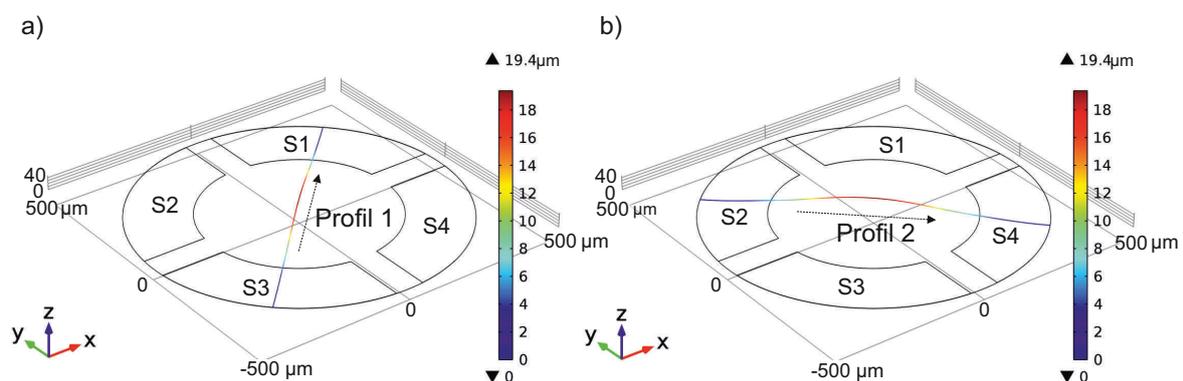


Abbildung 5.19: Querschnittsprofile durch a) die Mitte der Sektoren 3 und 1 und b) durch die Mitte der Sektoren 2 und 4 zur genauen Vermessung der Membranauslenkung

Mit dem entwickelten mechanischen Modell wird nun die theoretische Auslenkung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran mit einem Durchmesser von 1 mm bei Aktuierung einzelner oder aller Sektoren simuliert und die dadurch resultierende Veränderung der Membranoberfläche mithilfe der Querschnittsprofile dokumentiert. Bei allen Simulationen wurden an den Sektoren exemplarisch Spannungen angelegt, wobei bei allen Diagrammen die Auslenkung der Membranlinse bei 0 V in schwarz, bei +20 V in rot und bei -20 V in blau dargestellt wird. Für die Simulationen wurde ein d_{33} -Wert für die AlN-Schicht von -5 pm/V eingesetzt, welcher den realen gemessenen d_{33} -Werten der in dieser Arbeit verwendeten AlN-Schichten (siehe Kapitel 4.4) entspricht. Bei Anlegen einer positiven Spannung zieht sich die AlN-Schicht aufgrund der N-Polarität zusammen und die Auslenkung der unimorphen Linsenmembran verringert sich. Wird eine negative Spannung an die piezoelektrische Schicht angelegt, dehnt diese sich aus und vergrößert die Auslenkung der Linsenmembran.

Zu Beginn wurden alle vier Sektoren gleichzeitig mit den gleichen Spannungen (0 V, +20 V und -20 V) aktuiert (Abbildung 5.20a). Da sich beide Querschnittsprofile gleichen, wird an dieser Stelle nur das Querschnittsprofil 2 gezeigt. Hierbei ist eindeutig eine symmetrische Verformung der Membranoberfläche zu erkennen. Das neuartige Design der Multisegment-Mikrolinse sollte somit eine kontrollierte symmetrische Verformung der Linsenoberfläche und somit eine integrierte Fokuskorrektur, gemäß den Anforderungen in Kapitel 3.1, gewährleisten. Zur besseren Darstellung und Vermessung der maximalen Membranauslenkung h ist in Abbildung 5.20b nur der mittlere Bereich der Linsenmembran mit $d_L = 0.4$ mm dargestellt. Die maximale Auslenkung h repräsentiert die Differenz der Membranauslenkungen bei -20 V und +20 V und wird zu ≈ 2100 nm bestimmt. In den folgenden Abbildungen werden lediglich die mittleren Bereiche der Linsenmembran gezeigt.

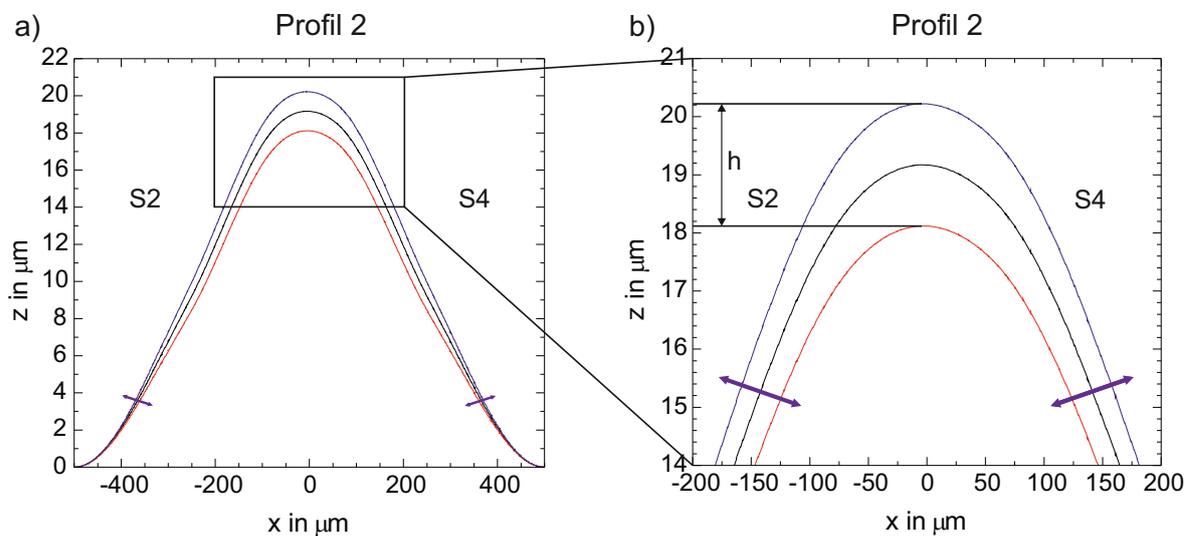


Abbildung 5.20: Simulierte Auslenkung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran bei Aktuierung aller vier Sektoren mit 0 V, +20 V und -20 V. Zur besseren Darstellung und Vermessung der Auslenkung ist in b) nur der mittlere Bereich der Linsenmembran dargestellt.

Als nächstes wurde ausschließlich Sektor 4 mit 0 V, +20 V und -20 V aktuiert, um exemplarisch die Auslenkung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran bei Anregung eines Sektors zu simulieren. In Abbildung 5.21 sind die entsprechenden Querschnittsprofile dargestellt. Hierbei ist ein deutlicher Unterschied in den beiden Profilen erkennbar. Eine asymmetrische Verschiebung der Linsenmembran findet lediglich entlang des angeregten Sektor 4 statt

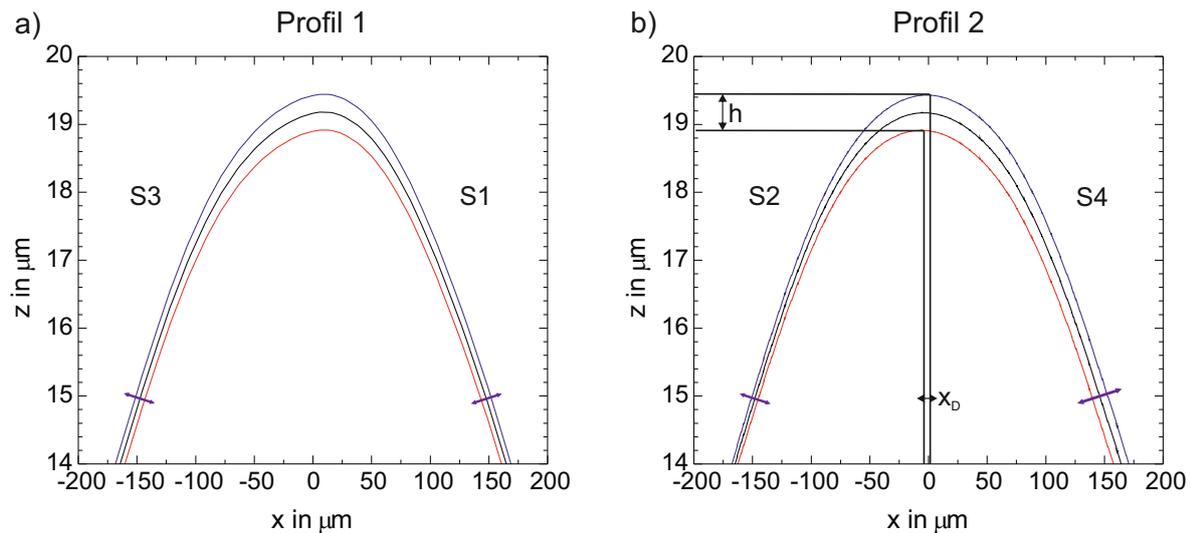


Abbildung 5.21: Simulierte Auslenkung der AlN/Si_xN_y-Linsenmembran bei Aktivierung des Sektors 4 mit 0 V, +20 V und -20 V. In a) ist das Querschnittsprofil 1 und in b) das Querschnittsprofil 2 dargestellt.

(Abbildung 5.21b). Das Querschnittsprofil durch die Sektoren 1 und 3 zeigt, dass in diesem Bereich die Linse lediglich symmetrisch ausgelenkt wird. Folglich ist auch eine asymmetrische Verschiebung der Linsenoberfläche und somit eine mögliche Wellenfrontkorrektur, gemäß den Anforderungen in Kapitel 3.1, realisierbar. Bei diesen Simulationen wurde eine maximale Auslenkung h zwischen -20 V und +20 V von ≈ 500 nm erreicht. Darüber hinaus wurde eine laterale Verschiebung der Membranauslenkung x_D von ≈ 4 µm erzielt.

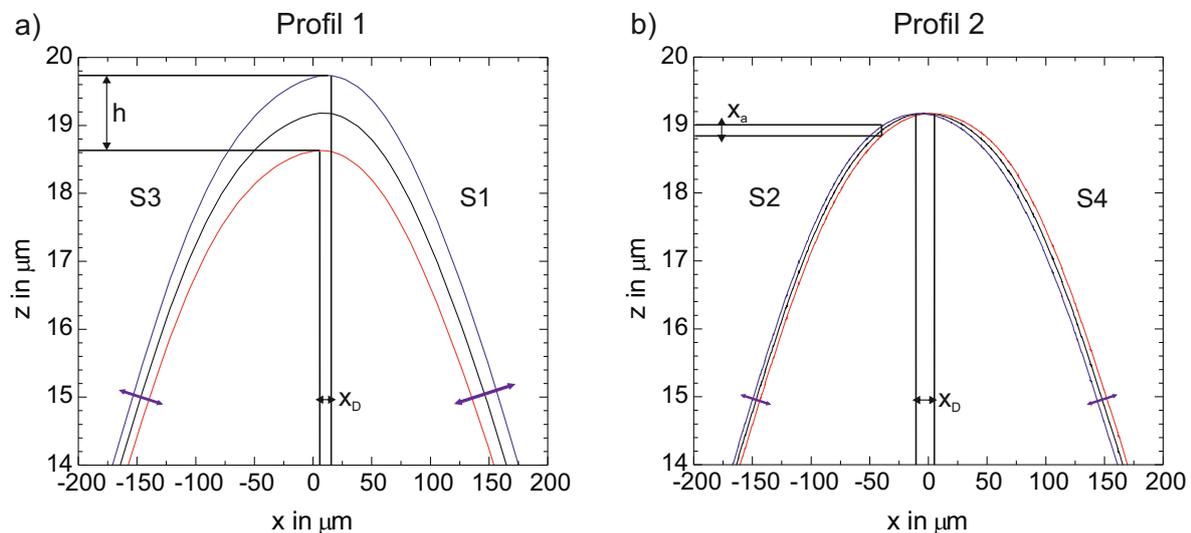


Abbildung 5.22: Simulierte Auslenkung der AlN/Si_xN_y-Linsenmembran a) bei Aktivierung des Sektors 1 und 2 mit 0 V, +20 V und -20 V und b) bei gleichzeitiger Aktivierung des Sektors 1 und 2 mit 0 V, +20 V und -20 V und Sektor 3 und 4 mit 0 V, -20 V und +20 V

Anschließend wurden zwei benachbarte Sektoren 1 und 2 gleichzeitig mit den gleichen Spannungen 0 V, +20 V und -20 V aktiviert. Im Querschnittsprofil 1 (Abbildung 5.22a) ist eindeutig eine asymmetrische Verschiebung der Linsenmembran entlang des Sektors 1 zu erkennen. Auf die Darstellung des Querschnittsprofils durch die Mitte der Sektoren 2

und 4 wird an dieser Stelle verzichtet, da sich die beiden Profile gleichen. Die maximale Auslenkung h ist deutlich größer als bei der Anregung eines Sektors (Abbildung 5.21b) und beträgt ≈ 1000 nm. Die laterale Verschiebung x_D der Membranauslenkung ergibt sich zu ≈ 6 μm .

Des Weiteren wurden alle vier Sektoren gleichzeitig mit unterschiedlichen Spannungen aktiviert. Hierfür wurden die benachbarten Sektoren 1 und 2 mit $+20$ V und die Sektoren 3 und 4 mit -20 V angeregt. Im umgedrehten Fall wurden die Sektoren 1 und 2 mit -20 V und die Sektoren 3 und 4 mit $+20$ V aktiviert. Im Querschnittsprofil 2 (Abbildung 5.22b) ist deutlich zu erkennen, dass es zu einer lateralen Verschiebung der Membranauslenkung x_D kommt. Diese ist mit ≈ 16 μm deutlich größer als bei der Aktivierung einzelner Sektoren. Zusätzlich kommt es zu einer Auslenkung x_a mit ≈ 110 nm. Die verschiedenen Ansteuerungsvarianten der vier Sektoren ermöglichen somit eine kontrollierte sphärische und asphärische Verformung der Linsenoberfläche gemäß den Anforderungen an die verstimmbare Mikrolinse in Kapitel 3.1.

In Tabelle 5.4 sind die simulierten Ergebnisse der maximalen Membranauslenkung h und der lateralen Verschiebung x_D der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse für verschiedene Ansteuerungsvarianten der vier Sektoren zusammengefasst.

Tabelle 5.4: Simulierte Ergebnisse der maximalen Membranauslenkung h und der lateralen Verschiebung der Membranauslenkung x_D der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm. x_a steht hierbei für die Auslenkung bei Anregung zweier gegenüberliegender Sektoren. Die vier Sektoren wurden dabei auf unterschiedliche Varianten angesteuert.

aktivierte Sektoren	angelegte Spannung in V	h in nm	x_D in μm
1 – 4	± 20	2100	0
4	± 20	500	4
1 und 2	± 20	1000	6
1 – 2, 3 – 4	+20, -20	$x_a = 110$	16

Zum Schluss wurde der Einfluss des piezoelektrischen Koeffizienten von AIN auf die Auslenkung der Membranoberfläche simuliert. Hierfür wurden alle vier Sektoren mit der gleichen Spannung ($+20$ V und -20 V) angeregt und der d_{33} -Koeffizient von AIN zwischen -6 pm/V und -1 pm/V variiert. Anschließend wurde ein Querschnittsprofil durch die Mitte der Sektoren 1 und 3 aufgenommen und die maximale Auslenkung zwischen $+20$ V und -20 V für die verschiedenen piezoelektrischen Koeffizienten bestimmt. Abbildung 5.23 zeigt die lineare Abhängigkeit zwischen der simulierten maximalen Auslenkung h der AIN/Si_xN_y-Linsenmembran und dem d_{33} -Koeffizienten der AIN-Schicht. Der piezoelektrische Koeffizient hat einen großen Einfluss auf die Auslenkung der Linsenmembran. Aus diesem Grund ist eine genaue Bestimmung des piezoelektrischen Koeffizienten der AIN-Schicht von großer Wichtigkeit.

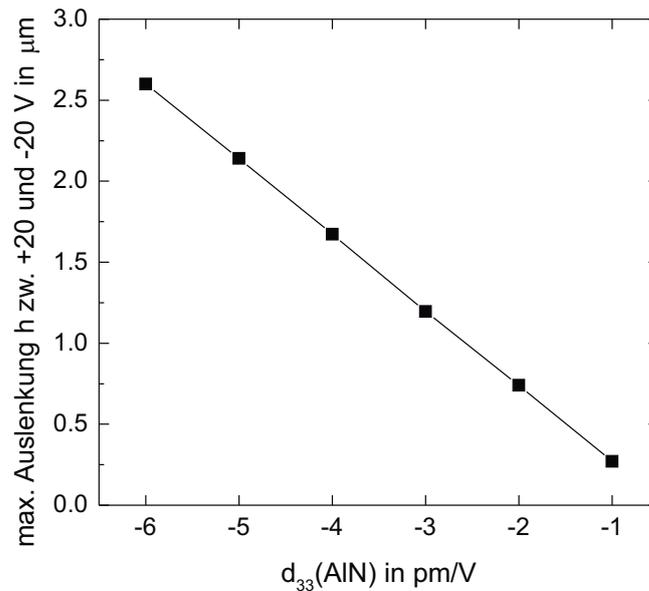


Abbildung 5.23: Abhängigkeit zwischen der simulierten maximalen Auslenkung h der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran bei gleicher Aktuierung der vier Sektoren und dem piezoelektrischen Koeffizienten d_{33} der AlN-Schicht. Die maximale Auslenkung h entspricht der Differenz der Membranauslenkung bei +20 V und -20 V.

5.7 Elektromechanische Charakterisierung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse

Um die Funktionalität der in dieser Arbeit entwickelten Bauelemente zu demonstrieren, wurden die $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen elektromechanisch charakterisiert. Hierfür wurde die piezoelektrisch gesteuerte Auslenkung der Multisegment- $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse statisch mit dem WLI und dynamisch mithilfe des Laser-Doppler-Vibrometers (LDV) untersucht. Die Auslenkung der Linsenmembran wird anschließend mit den in Kapitel 5.6 simulierten Ergebnissen verglichen und diskutiert.

Vor der elektromechanischen Charakterisierung wurden die spezifischen Widerstände der AlN-Schichten der einzelnen Sektoren bestimmt, um die maximal mögliche Anregungsspannung zu ermitteln. Die spezifischen Widerstände der AlN-Schichten lagen im Bereich von $10^2 \Omega\text{m}$ und $10^8 \Omega\text{m}$. Für die Demonstration der Funktionalität der Bauelemente wurden ausschließlich $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen verwendet, deren Sektoren einen spezifischen Widerstand zwischen $10^7 \Omega\text{m}$ und $10^8 \Omega\text{m}$ aufweisen. An diesen Linsen können Spannungen bis zu 20 V angelegt werden, um eine möglichst große piezoelektrische Wirkung zu erreichen. Die Referenzwerte für die spezifischen Widerstände von AlN-Dünnschichten in der Literatur betragen zwischen $10^9 \Omega\text{m}$ und $10^{11} \Omega\text{m}$ [230]. Elektrische Leitfähigkeiten entlang der Korngrenzen können die Widerstände und somit die Durchbruchfeldstärke von AlN deutlich verringern.

Zur Demonstration der Funktionalität der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen wurden die Chips mit den unimorphen Membranen wie in Kapitel 5.5 beschrieben in die Messhalterung integriert. Die Kavität unterhalb der Membran wurde durch den Zulauf mit Luft gefüllt. Eine daran angeschlossene Druckpumpe *AF1 pressure pump* der Firma Elveflow erzeugte den Arbeitsdruck. Für die statische und dynamische Vermessung der verstimmbaren Membranlinsen wurde auf die Verwendung von Immersionsöl verzichtet, da die Realisierung der Mem-

branauswölbung mit Luft deutlich einfacher durchzuführen ist und die Objektive des WLIs und LDVs bei eventuellen Reißen der Dünnschichtmembran vor dem Verschmutzen mit Immersionsöl geschützt sind. Vor der elektromechanischen Charakterisierung der piezoelektrisch aktuierten Mikrolinse wurden die Auslenkungen der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Membranen mit einem Durchmesser von 0,5 mm bis 2,0 mm mittels Weißlichtinterferometrie für verschiedene Arbeitsdrücke im Bereich von 0 kPa bis 80 kPa gemessen und die Brennweite der plankonvexen Linse für den jeweiligen Arbeitsdruck bestimmt. Für eine plankonvexe Linse mit $n_2 = 1$ (Luft), $R_1 = \infty$, und $R_2 < 0$ kann die Brennweite mit Gleichung 5.16 errechnet werden [10]

$$\frac{1}{f} = -\frac{n_2 - 1}{R_2}. \quad (5.16)$$

Der Krümmungsradius R_2 der plankonvexen Linse ist gegeben durch

$$R_2 = \frac{r^2 + h^2}{2h}, \quad (5.17)$$

mit r dem Radius und h der Auslenkung der Linse. Die Membranauslenkung wurde mit einem Weißlichtinterferometer *ContourGT* der Firma Bruker gemessen. Zur Bestimmung der Brennweite wurde angenommen, dass die Kavität unterhalb der Membran mit einem Immersionsöl mit $n = 1,517$ gefüllt ist. In Abbildung 5.24 sind die Brennweiten von vier $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen mit unterschiedlichem Durchmesser dargestellt.

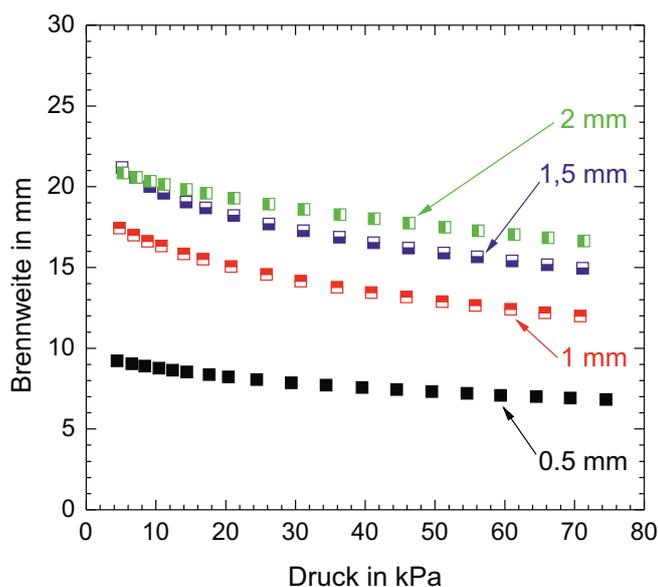


Abbildung 5.24: Änderung der Brennweite von $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen mit unterschiedlichen Durchmessern in Abhängigkeit vom angelegten Druck. Die Mikrolinsen haben einen Durchmesser von 0,5 mm (schwarz), 1 mm (rot), 1,5 mm (blau) und 2 mm (grün).

Die Brennweiten der Linsen können je nach Arbeitsdruck und Durchmesser der Mikrolinsen um $\approx 20 - 35\%$ variiert werden. Für eine $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm kann die Brennweite zwischen 11 mm und 17 mm eingestellt werden. Somit ist es möglich $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen mit numerischen Aperturen $\text{NA} \approx 0,1$ herzustellen. Die Auslenkung der Membran wird zudem von der intrinsischen mechanischen Verspannung der unimorphen Struktur bestimmt. Die höchsten Membranauslenkungen lassen sich mit druckverspannten $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembranen realisieren [99].

Für die elektromechanische Vermessung der Membranlinsen wurde ein konstanter Differenzdruck von $\approx 10^5$ Pa durch die Druckpumpe erzeugt, wodurch die zu vermessende Membran sphärisch vorgewölbt wird. Der Druck wurde während der Messung konstant gehalten, um lediglich die piezoelektrisch aktuierte Auslenkung der Linsenmembran zu detektieren.

Statische Vermessung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse

Die statische Vermessung der Membranauslenkung mittels Weißlichtinterferometrie wird exemplarisch an einer druckverspannten $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm gezeigt. Hierfür wurden nach der Vorauswölbung der Linsenmembran einzelne oder alle Sektoren aktuiert und die dadurch resultierende Veränderung der Membranoberfläche detektiert. Als Referenz wurde die Oberflächenkrümmung der Linsenmembran ohne eine angelegte Spannung bestimmt. Zusätzlich wurden wie bei der Simulation mit COMSOL Multiphysics bei jeder Messung zwei Querschnittsprofile durch die Mitte von zwei gegenüberliegenden Sektoren aufgezeichnet.

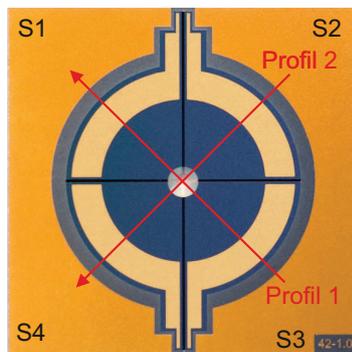


Abbildung 5.25: Darstellung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran mit den beiden Querschnittsprofilen 1 und 2 durch die Mitte der Sektoren 3 und 1 sowie der Sektoren 2 und 4

Abbildung 5.25 zeigt ein Foto der vermessenen $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse mit den entsprechenden Querschnittsprofilen. Bei den Messungen wurden an den Sektoren Spannungen von 0 V, +20 V und -20 V angelegt. Bei allen Diagrammen ist die Auslenkung der Membranlinse bei 0 V in schwarz, bei +20 V in rot und bei -20 V in blau dargestellt.

Zu Beginn wurden alle vier Sektoren gleichzeitig mit den gleichen Spannungen von 0 V, +20 V und -20 V aktuiert. Abbildung 5.26a zeigt die Oberflächentopographie der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran und Abbildung 5.26b die drei Profile der Membranoberfläche für 0 V, +20 V und -20 V. Da sich beide Querschnittsprofile gleichen, wird an dieser Stelle exemplarisch das Profil 2 gezeigt. Bei der Vermessung mit dem WLI kann die Reflexion von stark geneigten Flächen nicht mehr erfasst werden. Aus diesem Grund wird lediglich der mittlere Bereich der Linsenmembran mit $d_L = 0,4$ mm dargestellt. Die Messung zeigt eine deutliche symmetrische Verformbarkeit der Membranoberfläche. Es konnte eine maximale Auslenkung h von 600 nm erreicht werden. Werden alle vier Sektoren gleichzeitig mit der gleichen Spannung aktuiert, kann für den Fall, dass die Membran mit Immersionsöl vorgewölbt ist, die Brennweite der Linse zwischen 12,65 mm und 12,32 mm variiert werden. Eine kontrollierte sphärische Verformung der Linsenoberfläche ist somit, gemäß den Anforderungen in Kapitel 3.1, erfüllt.

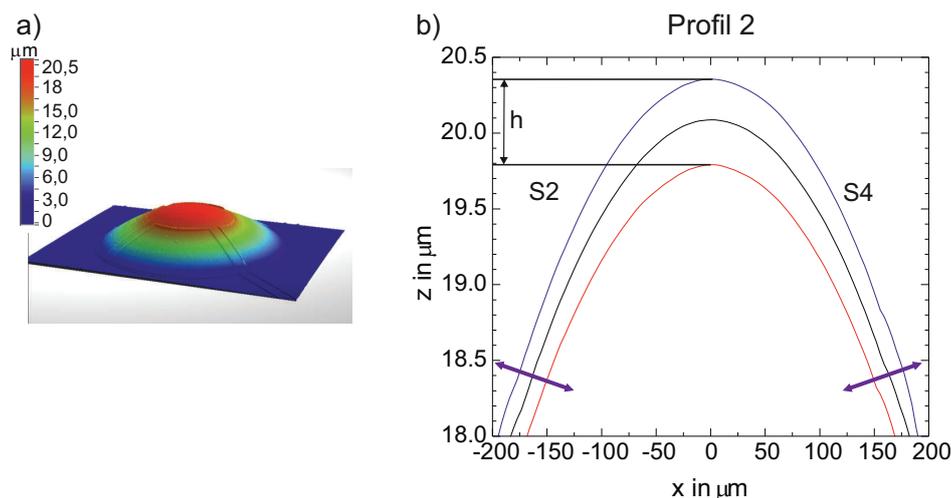


Abbildung 5.26: Darstellung a) der Oberflächentopographie der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran und b) des Querschnittsprofils der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran bei Aktivierung aller vier Sektoren mit 0 V, +20 V und -20 V

Um eine asphärische Verformung der Linsenoberfläche zu realisieren, wurde ausschließlich Sektor 4 exemplarisch mit 0 V, +20 V und -20 V aktuiert (Abbildung 5.27). Die entsprechenden Querschnittsprofile 1 und 2 unterscheiden sich deutlich voneinander. Das Querschnittsprofil 1 (Abbildung 5.27a) durch die Mitte der nicht angeregten Sektoren zeigt lediglich eine symmetrische Auslenkung, wohingegen das Profil 2 (Abbildung 5.27b) deutlich eine asymmetrische Verschiebung der Linsenmembran entlang des angeregten Sektors 4 aufzeigt. Die maximale Auslenkung h zwischen positiver und negativer Spannung und die laterale Verschiebung x_D betragen 150 nm und 6 μm . Mit dieser Messung wurde die unabhängige Funktionsweise der Multisektor-Aktoren demonstriert. Somit erlaubt die Multisegment-Mikrolinse wie in den Anforderungen in Kapitel 3.1 gewünscht eine kontrollierte asymmetrische Auslenkung der Linsenmembran und könnte somit als Korrektor von Wellenfrontfehlern dienen.

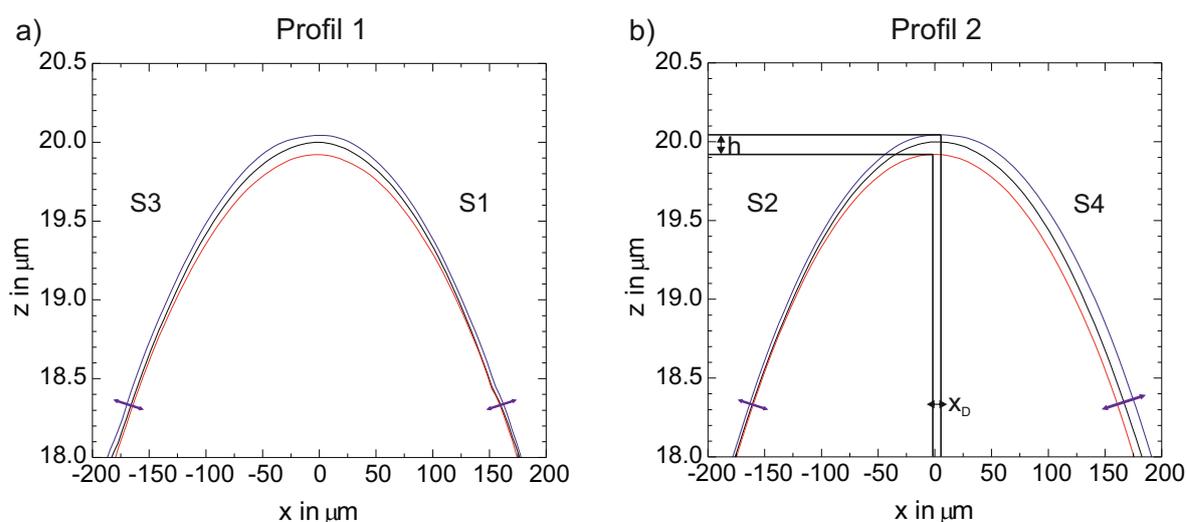


Abbildung 5.27: Querschnittsprofile der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran bei Aktivierung des Sektors 4 mit 0 V, +20 V und -20 V

Des Weiteren wurden zwei benachbarte Sektoren 1 und 2 mit den gleichen Spannungen von 0 V, +20 V und -20 V angeregt und die resultierenden Querschnittsprofile aufgenommen. In Abbildung 5.28a ist die asymmetrische Verschiebung der Linsenmembran entlang des Sektors 2 eindeutig erkennbar. Hierbei konnte eine maximale Auslenkung h von 290 nm und eine laterale Verschiebung x_D von 10 μm erreicht werden.

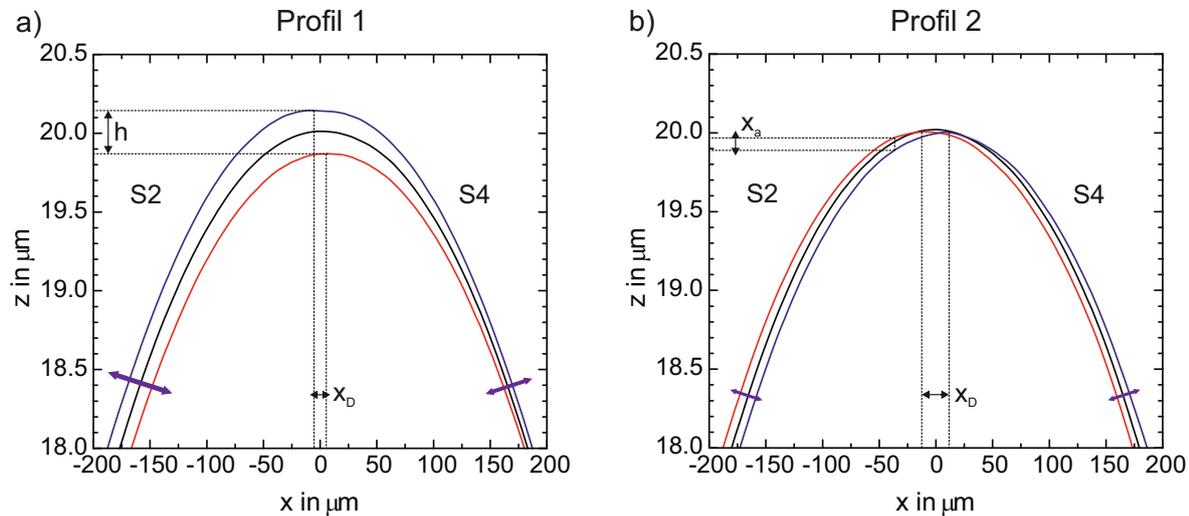


Abbildung 5.28: Querschnittsprofil der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran a) bei Aktuierung des Sektors 1 und 2 mit 0 V, +20 V und -20 V und b) bei gleichzeitiger Aktuierung des Sektors 1 und 2 mit 0 V, +20 V und -20 V und Sektor 3 und 4 mit 0 V, -20 V und +20 V

Zum Schluss wurden alle vier Sektoren gleichzeitig angeregt, wobei Sektor 1 und 2 mit +20 V und Sektor 3 und 4 mit -20 V und für den umgedrehten Fall, Sektor 1 und 2 mit -20 V und Sektor 3 und 4 mit +20 V aktuiert werden. In Abbildung 5.27b ist das Querschnittsprofil 2 gezeigt. Bei dieser Aktuierungsvariante der Sektoren kommt es, wie in Kapitel 5.6 mit COMSOL Multiphysics simuliert, zu einer lateralen Verschiebung x_D der Membranauslenkung von 22 μm , welche deutlich größer ist als bei den anderen Ansteuerungsvarianten. Zusätzlich konnte eine Auslenkung der Membran bei Anregung zweier gegenüberliegender Sektoren x_a von ≈ 100 nm erreicht werden. Die elektromechanische Charakterisierung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse mittels WLI hat gezeigt, dass die Multisegment-Mikrolinsen eine kontrollierte sphärische und asphärische Verformung der Linsenoberfläche gewährleisten. Durch diese kontrollierte Verformung der Membranoberfläche sollten sowohl Fokus- als auch Wellenfront- und Abbildungsfehler, welche in komplexen optischen Systemen auftreten können, korrigiert werden können.

Dynamische Vermessung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse

Die dynamische Leistung der Viersektoren- $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Membranlinse wurde mithilfe des Laser-Doppler-Vibrometers *MSA 500* der Firma Polytec untersucht. Das LDV *MSA 500* kann bei Frequenzen bis 25 MHz messen und verfügt zusätzlich über Weißlichtinterferometrie. Es ermöglicht die Untersuchung von vertikalen Schwingungen (engl.: *out-of-plane*) von Bauteilen und differentielle Messungen durch die Verwendung eines Referenzlasers. Mit dem LDV ist es möglich Schwingungsamplituden von nur wenigen Pikometern zu erfassen. Durch einen piezogetriebenen Messkopf ist ein Abrastern der Probenoberfläche möglich. Bei der Laser-Doppler-Vibrometrie wird die Frequenz eines Laserstrahls durch die Bewegung des

zu messenden Objektes moduliert und anschließend interferometrisch ausgewertet. Diese Messmethode beruht auf dem Prinzip eines heterodynen Mach-Zehnder-Interferometers. In Abbildung 5.29 ist das Funktionsprinzip des LDVs zur Vermessung von verstimmbaren Mikrolinsen schematisch dargestellt.

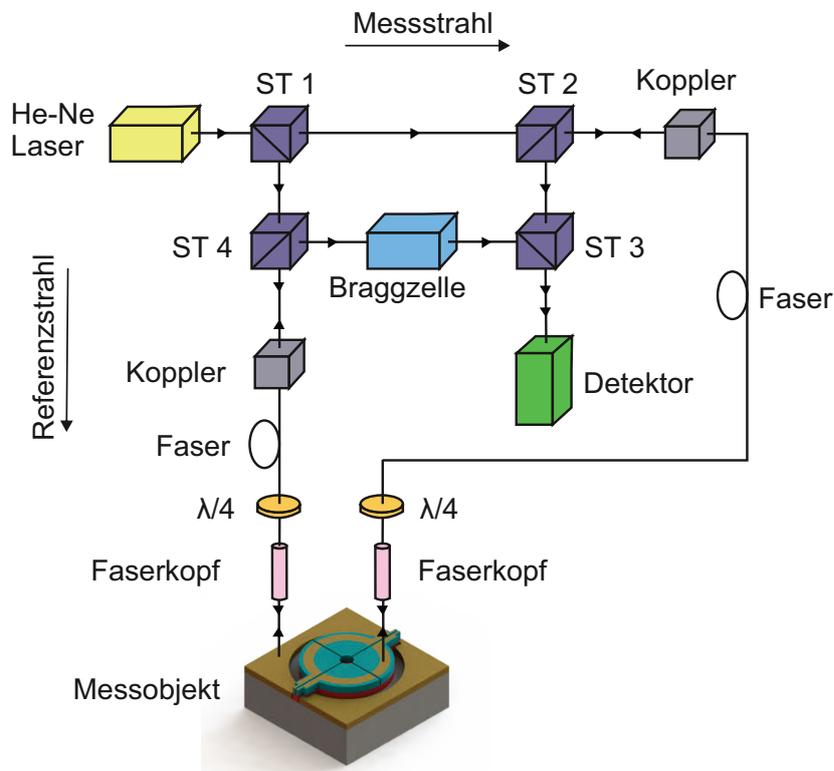


Abbildung 5.29: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Laser-Doppler-Vibrometers [231]

Der emittierte Strahl eines He-Ne-Lasers wird mithilfe eines Strahlteilers (ST 1) in zwei kohärente Strahlen, einem Mess- und Referenzstrahl, aufgeteilt. Der Referenzstrahl durchtritt den Strahlteiler 4 und wird in eine optische Faser eingekoppelt. Anschließend wird der Strahl auf eine Position auf der Probenoberfläche der Mikrolinse fokussiert, welche sich außerhalb der verformbaren Mikrolinse befindet und somit nicht in Bewegung ist. Der Messstrahl wird nach Durchqueren des Strahlteilers 2 auf die zu untersuchende Probenoberfläche gerichtet. Der Mess- und Referenzstrahl werden an der Probenoberfläche reflektiert, im Strahlteiler 3 zusammengeführt und zum Detektor weitergeleitet. Durch die Bewegung der Probenoberflächen verändert sich aufgrund des Dopplereffektes die Frequenz und die Phase des Laserlichts. Die Doppler-Frequenzverschiebung f_D der Welle beträgt:

$$f_D = \frac{2v(t)}{\lambda}. \quad (5.18)$$

$v(t)$ ist die Geschwindigkeit des Messobjektes und λ die Wellenlänge des verwendeten Lasers. Der Mess- und Referenzstrahl besitzen unterschiedliche optische Pfadlängen, weshalb sie am Detektor miteinander interferieren. Die Gesamtintensität beider Strahlen wird moduliert gemäß Gleichung 5.19:

$$I_{ges} = I_M + I_R + 2\sqrt{I_M I_R} \cos[2\pi(r_M - r_R)/\lambda]. \quad (5.19)$$

Hierbei sind I_M und I_R die Intensitäten und r_M und r_R die optischen Pfadlängen des Mess- und Referenzstrahls. Entspricht die Wegdifferenz zwischen den beiden Strahlen einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge des Lichtes, ist die Gesamtintensität das Vierfache einer Einzelintensität. Die Änderung des Interferenzmusters auf dem Detektor ist ausschließlich von der Bewegung der zu messenden Probenoberfläche abhängig, da der optische Weg des Referenzstrahls zeitlich konstant ist. Eine Auslenkung des Messobjektes um genau einer halben Wellenlänge des verwendeten Lasers entspricht einem kompletten Hell-Dunkel-Zyklus auf dem Detektor. Das Interferenzmuster lässt allerdings keine Rückschlüsse auf die Bewegungsrichtung zu. Aus diesem Grund wird ein akusto-optischer Modulator, eine sogenannte Bragg-Zelle, in den Strahlengang eingesetzt. Dadurch erhält das Referenzsignal eine feste Verschiebung der Licht-Frequenz um 40 MHz bei Stillstand des zu messenden Objektes. Die Modulationsfrequenz vergrößert sich, sobald sich das Messobjekt auf das Interferometer zu bewegt. Entfernt sich hingegen das Objekt vom Vibrometer, reduziert sich die detektierte Frequenz. Die Frequenz- bzw. Phasenmodulation des Laserlichts wird mithilfe von Demodulatoren (Decodern) zurückgewonnen. Das LDV *MSA 500* verfügt zu Dekodierung der Geschwindigkeitsinformationen und der Auslenkung des zu messenden Objektes über zwei Decoder. Hierbei wird die Geschwindigkeitsinformation aus der Frequenzmodulation des Dopplersignals und das Wegsignal aus der Phasenmodulation zurückgewonnen. Die Auslenkung der Membranlinse konnte mit einer Auflösung von 2 pm gemessen werden. Für eine detaillierte Beschreibung der LDV-Messmethodik sei auf [232] verwiesen.

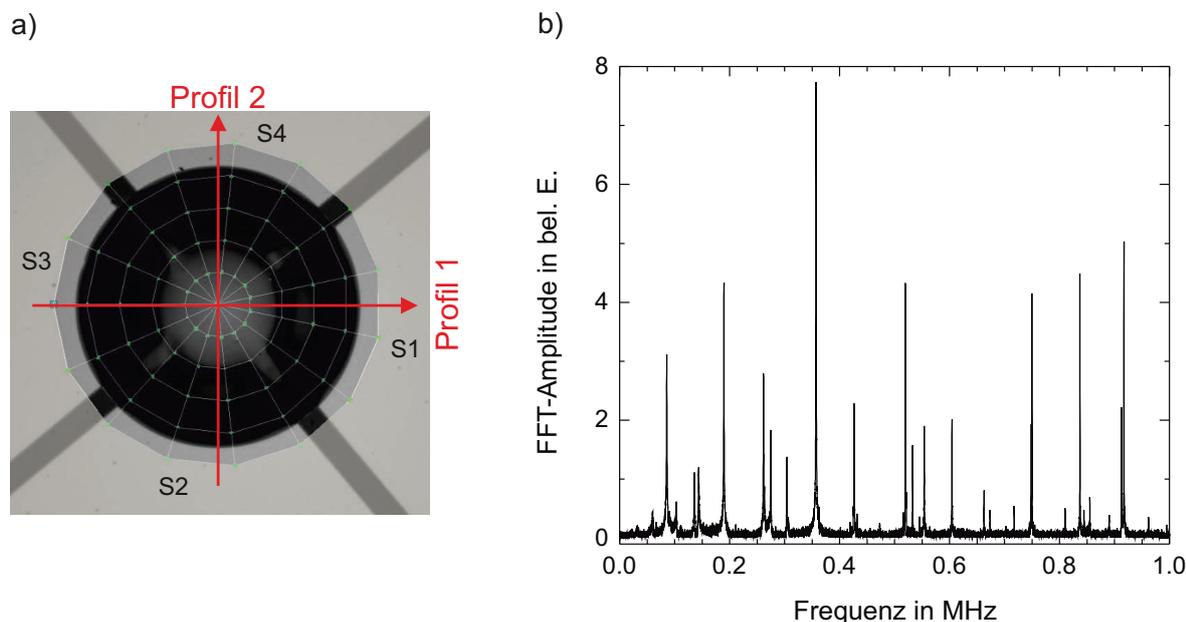


Abbildung 5.30: a) Kamerabild mit dem entsprechenden Messgitter und Querschnittsprofilen und b) Frequenzspektrum im Bereich zwischen 0 Hz und 1 MHz einer AlN/Si_xN_y -Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm

Die dynamische Vermessung der Membranauslenkung mittels LDV wird exemplarisch an einer AlN/Si_xN_y -Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm gezeigt. Das Frequenzspektrum dieser Mikrolinse ist in Abbildung 5.30b dargestellt. Zu Beginn der Messung wurde ein Messgitter auf das Kamerabild der Mikrolinse gelegt (Abbildung 5.30a). Die Messpunkte auf dem Gitter wurden nach und nach abgerastert und die Daten mithilfe der

LDV-Software zu einer Animation zusammengefügt. Die Schwingungsanregung der Mikrolinse erfolgt durch die piezoelektrische AlN-Schicht. Hierfür wurden einzelne Sektoren der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran mithilfe eines Funktionsgenerators 33250A der Firma Agilent aktuiert und die resultierende Veränderung der Membranoberfläche mit dem Vibrometer detektiert. Da nur Änderungen der Membranauslenkung gemessen werden können, wird die Oberflächenkrümmung der vorgewölbten Linsenmembran ohne angelegte Spannung bei der Vermessung mit dem LDV als planare Oberfläche dargestellt. Aus diesem Grund kann die laterale Verschiebung der Membranauslenkung bei der dynamischen Vermessung nicht bestimmt werden. Bei jeder Messung wurden wie bei der statischen Charakterisierung der Mikrolinsen zwei Querschnittsprofile durch die Mitte von zwei gegenüberliegenden Sektoren aufgezeichnet (Abbildung 5.30a). Der Referenzlaser wird auf eine Stelle der Mikrolinse ausgerichtet, welche in Ruhe ist. Bei allen LDV-Messungen wurden an einzelnen Sektoren ein sinusförmiges Signal mit einer Amplitude von 10 V angelegt und Frequenzen gewählt, wo keine Resonanzen der Mikrolinse auftreten (siehe Abbildung 5.30b). Hierbei ist die Auslenkung der Membranlinse bei +10 V in rot und bei -10 V in blau dargestellt.

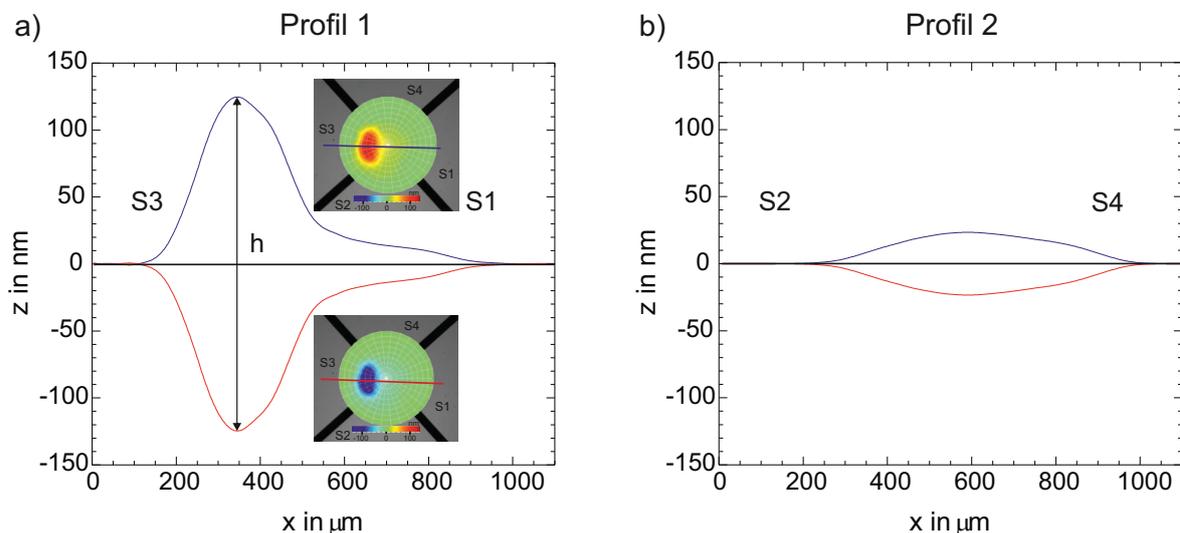


Abbildung 5.31: Querschnittsprofil der maximalen Auslenkung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran bei Aktuierung des Sektors 3 mit einer Wechselspannung von +10 V und -10 V bei einer Frequenz von 400 Hz gemessen mit Laser-Doppler-Vibrometrie

Zu Beginn wurde Sektor 3 mit einer Frequenz von 400 Hz angeregt (Abbildung 5.31). Das Profil 1 (Abbildung 5.31a) zeigt eine asymmetrische Auslenkung der Linsenmembran entlang des angeregten Sektors 3, wohingegen das Profil 2 (Abbildung 5.31b) lediglich eine geringe symmetrische Verformung aufweist. Diese Messung demonstriert ebenfalls die unabhängige Funktionsweise der Viersektor-Aktoren. Die maximale Auslenkung h zwischen +10 V und -10 V wurde für diese $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran zu 250 nm bestimmt.

Weiterhin wurden zwei benachbarte Sektoren 1 und 2 gleichzeitig mit einem sinusförmigen Signal mit einer Amplitude von 10 V bei einer Frequenz von 500 Hz angeregt. Abbildung 5.32 zeigt die minimale und maximale Auslenkung der Membran sowie exemplarisch das Querschnittsprofil 1 bei Aktuierung der Sektoren 1 und 2. Hierbei ist eindeutig eine asymmetrische Auslenkung der Linsenmembran entlang des Sektors 1 erkennbar. Die maximale Auslenkung h zwischen +10 V und -10 V beträgt 300 nm.

Die Anregungsfrequenz wurde in weiteren Messungen stetig erhöht, um die mögliche Reaktionszeit der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse zu bestimmen. Erst bei einer Frequenz von 50 kHz

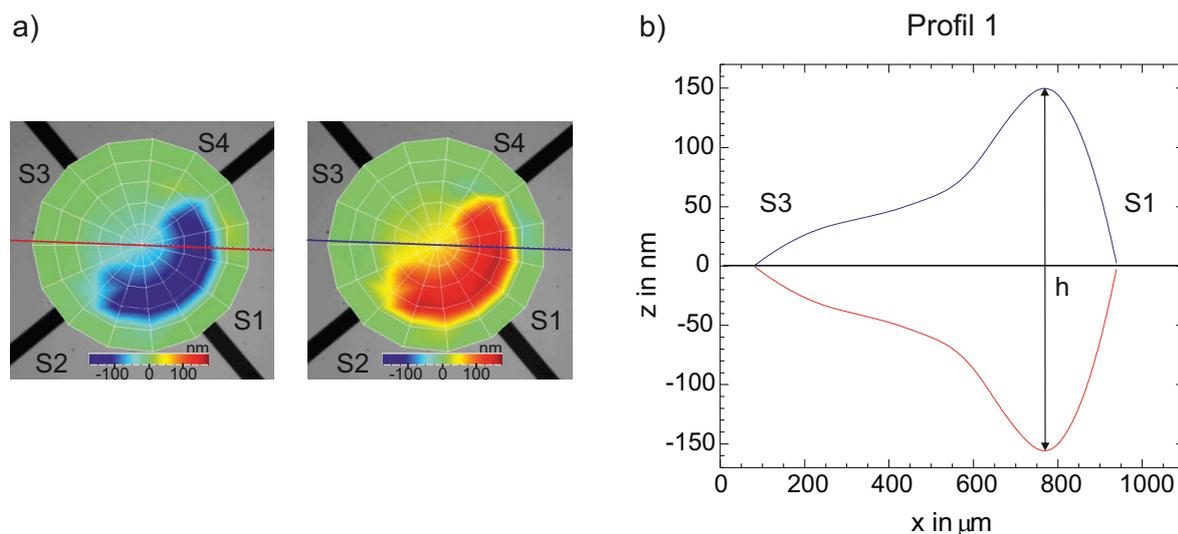


Abbildung 5.32: a) Maximale Auslenkung der asphärischen Verformung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran und b) Querschnittsprofil 1 bei gleichzeitiger Aktuierung des Sektors 1 und 2 mit einer Wechselfspannung von $+10\text{ V}$ und -10 V bei einer Frequenz von 500 Hz gemessen mit Laser-Doppler-Vibrometrie

konnte eine deutliche Reduzierung der Membranauslenkung h bei gleichzeitiger Aktuierung von Sektor 1 und 2 festgestellt werden. Diese beträgt bei einer Anregungsfrequenz von 50 kHz 150 nm und ist somit nur noch halb so groß wie die Auslenkung bei niedrigeren Frequenzen. Die $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen erlauben somit sehr kurze Reaktionszeiten bis in den μs -Bereich. Wird die Linse mit Immersionsöl vorgewölbt, wird sich die Reaktionszeit aufgrund der Dämpfung reduzieren. Um eine Verschmutzung des Messaufbaus zu verhindern, wurde auf die dynamische Charakterisierung der Mikrolinse mit Immersionsöl verzichtet. Dennoch sollte die Reaktionszeit mit Immersionsöl deutlich kürzer sein im Vergleich mit den Reaktionszeiten der in der Literatur bekannten verstimmbaren Mikrolinsen und sollte somit, gemäß den Anforderungen (siehe Kapitel 3.1, Anforderung 3), eine schnelle Fokus- und Wellenfrontkorrektur ermöglichen.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der maximalen Membranauslenkung h und der lateralen Verschiebung x_D für die statische und dynamische Vermessung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembranen sowie der Vergleich mit den simulierten Ergebnissen sind in Tabelle 5.5 zusammengefasst. Für die statische und dynamische Charakterisierung wurden zwei unterschiedliche $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsen mit einem Durchmesser von 1 mm verwendet, wodurch die Messwerte untereinander nicht direkt vergleichbar sind.

Beim Vergleich der realen Änderung der Membranoberfläche mit der simulierten Auslenkung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse lässt sich feststellen, dass die reale Membranauslenkung h ca. 70% geringer ist als die theoretisch zu erwartende Auslenkung. Der Unterschied in den piezoelektrischen Eigenschaften der AlN-Schicht könnte eine Erklärung hierfür sein. Für die Simulationen wurde ein d_{33} -Wert der AlN-Schicht mit -5 pm/V angenommen. Da für die Bestimmung des piezoelektrischen Koeffizienten der Wafer mit der zu untersuchenden Schicht vereinzelt werden muss, konnte der reale d_{33} -Wert der AlN-Schicht, die zur Herstellung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen verwendet wurde, nicht bestimmt werden. Der d_{33} -

Tabelle 5.5: Simulierte und reale Ergebnisse der maximalen Membranauslenkung h und der lateralen Verschiebung der Membranauslenkung x_D der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse mit einem Linsendurchmesser von 1 mm. Die vier Sektoren wurden auf unterschiedliche Varianten angesteuert. Hierbei steht n. m. für nicht messbar.

aktuierte Sektoren	U in V	h in nm			x_D in μm		
		Simulation	WLI	LDV	Simulation	WLI	LDV
1 – 4	± 20	2100	600	-	0	0	-
4 oder 3	$\pm 20, \pm 10$ (LDV)	500	150	250	4	6	n. m.
1 und 2	$\pm 20, \pm 10$ (LDV)	1000	290	300	6	10	n. m.
1 – 2, 3 – 4	± 20	$x_a = 110$	$x_a = 100$	-	16	22	-

Wert der AIN-Schicht in den AIN/Si_xN_y-Mikrolinsen könnte deshalb kleiner sein als der für eine vergleichbare AIN-Schicht bestimmte piezoelektrische Koeffizienten von -3 pm/V bis -5 pm/V (siehe Kapitel 4.4). Die Simulationen in Kapitel 5.6 haben gezeigt, dass der d_{33} -Wert einen großen Einfluss auf die Auslenkung der Linsenmembran hat. Darüber hinaus kann es während der Prozessierung der AIN/Si_xN_y-Mikrolinsen zu Diffusion von Fremdatomen in die piezoelektrische AIN-Schicht kommen, welche den piezoelektrischen Koeffizienten und die Durchbruchfeldstärke von AIN deutlich verringern können. Die reale Auslenkung der Linsenmembran könnte durch eine Erhöhung der Anregungsspannung vergrößert werden. Jedoch ist die maximale Spannung, die an das piezoelektrische Material angelegt werden kann, durch die Durchbruchfeldstärke des AIN begrenzt.

5.8 Wellenfrontmessung mit dem Shack-Hartmann-Sensor

Die optische Leistungsfähigkeit der AIN/Si_xN_y-Mikrolinsen wurde mithilfe eines Wellenfrontsensors, dem Shack-Hartmann-Sensor (SHS), untersucht. Hierfür wurden die unimorphen Membranen wie in Kapitel 5.5 beschrieben in die Messhalterung integriert und die AIN/Si_xN_y-Mikrolinsen mit einem Immersionsöl mit $n = 1,517$ mit einem Differenzdruck von $\approx 10^5 \text{ Pa}$ vorgewölbt, um die plankonvexe Linsen zu realisieren. Der Arbeitsdruck wurde mit einer Druckpumpe der Firma Elveflow erzeugt und während den Messungen konstant gehalten. Zur Demonstration der optischen Wirkungsweise der verstimmbaren Mikrolinse wurde die gezielte Änderung einer einfallenden ebenen Wellenfront durch die Aktuierung der Multisegment-AIN/Si_xN_y-Mikrolinse untersucht (siehe Abbildung 5.33). Die durch die Aktuierung der Linse verursachten Wellenfrontaberrationen wurden mithilfe eines Shack-Hartmann-Sensors *SHSLab BR-110-GE* der Firma Optocraft aufgezeichnet. Das Messprinzip eines Shack-Hartmann-Wellenfrontsensors ist in Abbildung 5.33 dargestellt.

Der SHS besteht aus einem Mikrolinsenarray und einem optischen zweidimensionalen Detektor. Das Linsenarray zerlegt die einfallende Wellenfront in ein Gitter kleinerer Bereiche, welche anschließend durch die Mikrolinsen auf den ortsauflösenden Photodetektor, eine

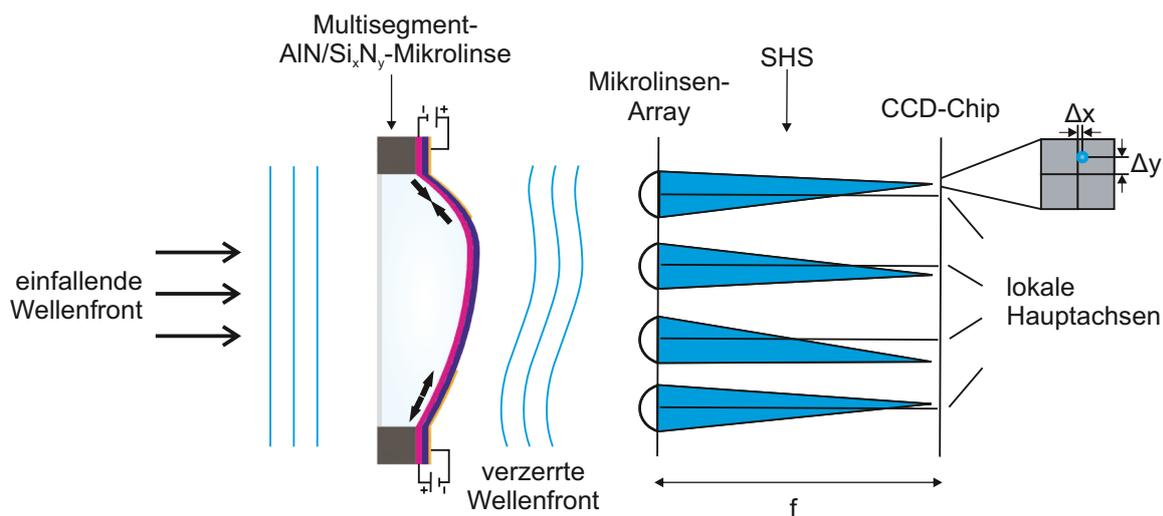


Abbildung 5.33: Messprinzip des Shack-Hartmann-Wellenfrontensensors. Durch die Aktuierung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse kommt es zu einer Verzerrung der einfallenden ebenen Wellenfront, welche ein charakteristisches Punktmuster auf dem Kamerachip erzeugt. Mithilfe des Punktmusters kann die Wellenfront rekonstruiert werden.

Charge-Coupled Devices (CCD)-Kamera, fokussiert werden und dort ein charakteristisches Punktmuster erzeugen. Die CCD-Kamera befindet sich im Abstand der Brennweite f des Mikrolinsenarrays. Der für diese Arbeit verwendete Shack-Hartmann-Sensor der Firma Optocraft besteht aus einem $0,11 \times 0,11 \text{ mm}^2$ Mikrolinsenarray mit einer Brennweite f von $2,877 \text{ mm}$. Die CCD-Kamera hat eine Pixelgröße von $4,65 \times 4,65 \mu\text{m}^2$. Vor der eigentlichen Messung der Wellenfrontaberrationen wird eine durch eine kalibrierte Lichtquelle erzeugte ebene Referenzwellenfront bestimmt. Eine verzerrte Wellenfront hat eine laterale Verschiebung der Fokuspunkte bezogen auf die vorher bestimmten Referenzpositionen zur Folge. Mithilfe dieser Spotverschiebungen lassen sich die lokalen Wellenfrontneigungen der zu messenden Wellenfront, die ersten Ableitungen der Wellenfront, bestimmen [233, 234]. Die erste Ableitung der Wellenfront $\nabla\Phi$ ist gegeben durch [235]

$$[\nabla\Phi]_{ik} = \left[\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \Phi \right]_{ik} = \left[\frac{1}{f} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} \right]_{ik}. \quad (5.20)$$

Hierbei sind Δx und Δy die Verschiebungen des Shack-Hartmann-Spots und f die Brennweite des Mikrolinsenarrays. Bei der Vermessung der Wellenfrontaberrationen mit dem SHS sind die Messgenauigkeit und der dynamische Messbereich korrelierende Größen. Der kleinste messbare Neigungswinkel β_{min} der Wellenfront ist gegeben durch

$$\beta_{min} = \frac{\Delta s_{min}}{f}, \quad (5.21)$$

mit Δs_{min} der kleinsten noch messbaren Verschiebung des Fokuspunktes. Dieser wird durch die Pixelgröße der CCD-Kamera bestimmt und hängt von dem Signal-Rausch-Verhältnis der Messung ab. Bei sehr starken Wellenfrontaberrationen kann der Fokuspunkt der Linse aus dem Linsenbereich wandern oder mit anderen Fokuspunkten in den Bereich einer benachbarten Linse überlappen. Der maximal detektierbare Neigungswinkel β_{max} ist somit abhängig vom jeweiligen Linsendurchmesser d_L und der Brennweite f der Mikrolinsen

$$\beta_{max} = \frac{d_L/2}{f}. \quad (5.22)$$

Um die Messgenauigkeit zu erhöhen und damit β_{min} zu reduzieren, muss die Brennweite der Mikrolinsen erhöht werden, was eine Verringerung des dynamischen Messbereichs zur Folge hätte [236].

Zur Rekonstruktion der Wellenfront stehen verschiedene Methoden zur Verfügung [235]. In dieser Arbeit wurde ausschließlich das Verfahren der modalen Rekonstruktion verwendet. Aus diesem Grund wird auf die Erläuterung alternativer Methoden verzichtet. Bei der modalen Rekonstruktion wird die Wellenfront an Polynome angepasst und die komplexe Wellenfront anschließend aus diesen Basisfunktionen zusammengesetzt. Die Aberrationen von Wellenfronten werden üblicherweise mathematisch mit Zernike-Polynomen beschrieben [237]. Jedes Zernike-Polynom beschreibt hierbei einen bestimmten Abbildungsfehler. Sie sind laut der in [238] eingeführten Norm orthogonal und untereinander unabhängig. Zur Vereinfachung werden die Zernike-Polynome $Z_n^m(\rho, \theta)$ in Polarkoordinaten (ρ, θ) auf einem Einheitskreis definiert. Sie setzen sich aus einem radiusabhängigen Teil R_ρ mit $0 \leq \rho \leq 1$ und einem winkelabhängigen Teil R_θ zusammen. θ stellt hierbei den azimutalen Winkel im Bogenmaß dar und liegt zwischen 0 und 2π . Der tiefgestellte Index n gibt die radiale und der hochgestellte Index m die azimutale Ordnung, die Anzahl der Perioden bei einem Umlauf, an. Meist wird anstelle der beiden Indizes n und m ein Index j benutzt, welcher die Modi kennzeichnet und aus n und m berechnet werden kann mit

$$j = \frac{n(n+2) + m}{2}. \quad (5.23)$$

Die Wellenfront wird als Summe der Zernike-Polynome Z_j mit Gleichung 5.24 dargestellt [238]:

$$\Phi(R\rho, \theta) = \sum_{j=1}^{\infty} a_j Z_j(\rho, \theta). \quad (5.24)$$

Hierbei bezeichnen a_j die Koeffizienten der Zernike-Polynome Z_j j-ter Ordnung. Die Zernike-Polynome sind nach der in [238] eingeführten Norm folgendermaßen definiert:

$$\begin{aligned} Z_j(\rho, \theta) &= Z_n^m(\rho, \theta) = \sqrt{n+1} R_n^m(\rho) \sqrt{2} \cos(m\theta), & \text{wenn } m > 0 \\ Z_j(\rho, \theta) &= Z_n^m(\rho, \theta) = \sqrt{n+1} R_n^m(\rho) \sqrt{2} \sin(m\theta), & \text{wenn } m < 0 \\ Z_j(\rho, \theta) &= Z_n^m(\rho, \theta) = \sqrt{n+1} R_n^m(\rho), & \text{wenn } m = 0 \end{aligned} \quad (5.25)$$

mit

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left[\frac{(n+m)}{2} - s \right]! \left[\frac{(n-m)}{2} - s \right]!} \rho^{n-2s}. \quad (5.26)$$

Dabei sind n und m ganzzahlige Zahlen, $m \leq n$, $(n-m)$ stets gerade und j gerade, wenn $m \geq 0$ ist [238]. Die Polynome werden nach aufsteigendem n und anschließend für ein gegebenes n nach m aufsteigend sortiert. Die Zernike-Polynome bis zur 4. Ordnung sind in Kapitel A.3 graphisch sowie in ihrer polaren Schreibweise dargestellt.

Die optische Charakterisierung wurde an einer Multisegment-AIN/Si_xN_y-Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm durchgeführt. Der Versuchsaufbau zur optischen Vermessung der Mikrolinse ist in Abbildung 5.34 schematisch dargestellt.

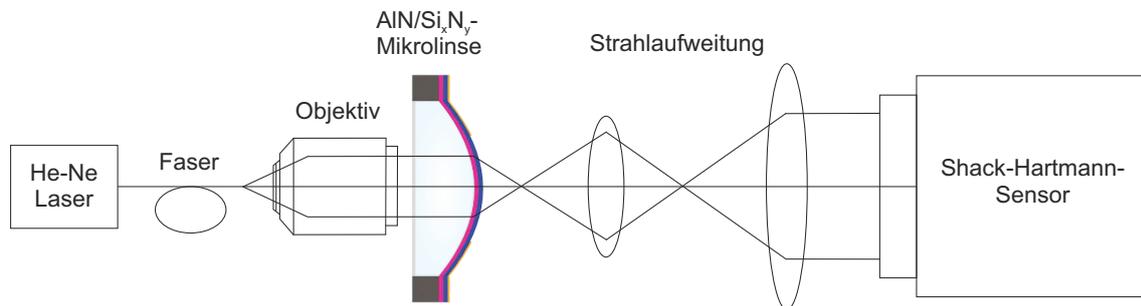


Abbildung 5.34: Versuchsaufbau zur Messung der Wellenfrontänderung der piezoelektrisch aktuierten AIN/Si_xN_y-Mikrolinse

Der emittierte Strahl eines He-Ne-Lasers mit einer Wellenlänge von 632,8 nm wird in eine Glasfaser eingekoppelt und mithilfe eines 10x-Objektives vergrößert. Anschließend wird der Strahl durch die AIN/Si_xN_y-Mikrolinse geführt und aufgeweitet, bevor er auf den Shack-Hartmann-Sensor trifft. Zur Charakterisierung der optischen Wirkungsweise der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse wurden nach der Vorwölbung der Linse einzelne oder alle Sektoren aktuiert und die daraus resultierende veränderte Wellenfront detektiert. Mit der Software *SHSLab Basic* des Shack-Hartmann-Sensors können die Zernike-Polynome der gemessenen Wellenfront bestimmt werden. Diese wurden im Anschluss in MATLAB eingelesen und die Wellenfronten rekonstruiert.

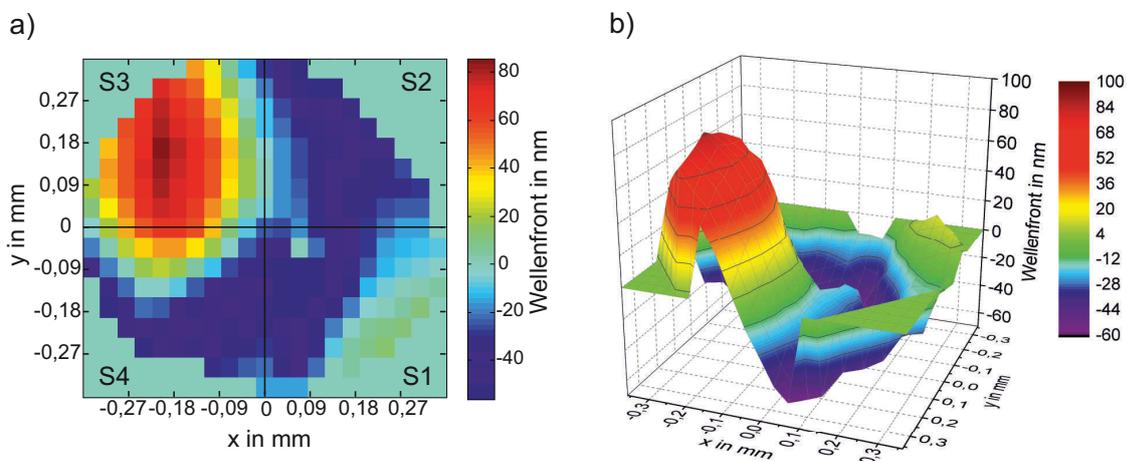


Abbildung 5.35: Darstellung der Änderung der Wellenfront bei Aktuierung des Sektors 3 der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse mit ±15 V in a) 2D und b) 3D

Zu Beginn wurde ausschließlich Sektor 3 der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse mit +15 V und -15 V aktuiert und jeweils die daraus resultierende verzerrte Wellenfront mithilfe der Zernike-Polynome rekonstruiert. Zur besseren Darstellung der Wellenfrontaberrationen, welche durch die kontrollierte asphärische Verformung der Linsenoberfläche verursacht werden, wurde die Differenz der Wellenfrontänderung bei +15 V und -15 V erzeugt und lediglich der mittlere Bereich der Linsenmembran mit $d_L = 0,72$ mm dargestellt. Abbildung 5.35 zeigt die Änderung der Wellenfront in 2D (Abbildung 5.35a) und exemplarisch in 3D

(Abbildung 5.35b) bei Aktuierung des Sektors 3. Hierbei ist eindeutig die größte Änderung der Wellenfront im Bereich des angeregten Sektors 3 zu erkennen. Folglich ist mit der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse eine kontrollierte Manipulation der Wellenfront realisierbar.

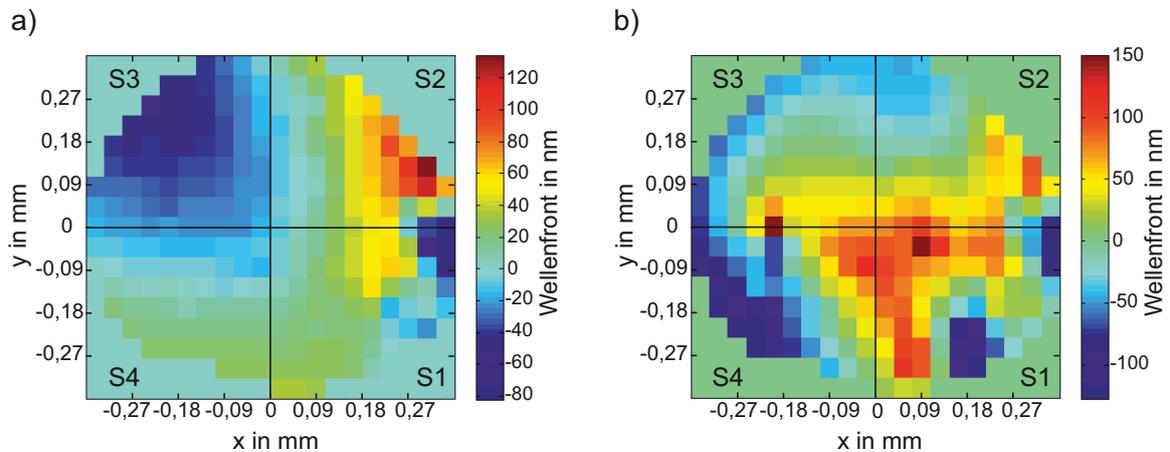


Abbildung 5.36: Darstellung der Änderung der Wellenfront bei a) Aktuierung des Sektors 1 und 2 mit ± 10 V und b) Aktuierung aller vier Sektoren der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse mit ± 10 V

Des Weiteren wurden zwei benachbarte Sektoren, Sektor 1 und 2, der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse mit den gleichen Spannungen von +10 V und -10 V angeregt und die daraus resultierenden verzerrten Wellenfronten aufgenommen. Die Differenz der Wellenfrontänderung bei +10 V und -10 V ist in 2D in Abbildung 5.36a dargestellt. Die größte Änderung der Wellenfront ist in dem Bereich der angeregten Sektoren 1 und 2 zu erkennen.

Zum Schluss wurden alle vier Sektoren gleichzeitig mit den gleichen Spannungen von +10 V und -10 V angeregt, um die AIN/Si_xN_y-Mikrolinse sphärisch zu verformen. Die Wellenfrontänderungen bei +10 V und -10 V wurden detektiert und die Differenz aus diesen beiden Wellenfronten gebildet. Abbildung 5.36b zeigt die Wellenfrontänderung bei Aktuierung der Sektoren 1-4 mit ± 10 V. Eine gezielte Änderung der Wellenfront ist in allen vier Sektoren sichtbar. Hierbei ist jedoch zu erkennen, dass die Wellenfrontänderung nicht in allen Sektoren gleich und somit nicht symmetrisch ist. Bei der Anregung aller vier Sektoren scheint sich bei dieser Mikrolinse die Linsenoberfläche nicht völlig symmetrisch zu verformen. Ein Grund hierfür könnte eine lokale Inhomogenität der Schichtspannung, der Schichtdicke sowie der piezoelektrischen Qualität und des spezifischen Widerstandes des AIN in den einzelnen Sektoren sein.

Die optische Charakterisierung der Multisegment-AIN/Si_xN_y-Mikrolinse hat gezeigt, dass eine gezielte Manipulation der Wellenfront bei Aktuierung einzelner oder aller Sektoren realisierbar ist. Durch die asphärische Verformung der AIN/Si_xN_y-Linsenoberfläche sollte es somit möglich sein, geringe Abbildungsfehler zu korrigieren. Die Anzahl der Sektoren reicht jedoch nicht aus, um gezielt einzelne Zernike-Koeffizienten zu beeinflussen. Um dies zu erreichen, ist eine größere Anzahl und eine radiale Anordnung der Sektoren wie bei den adaptiven Spiegeln notwendig [239, 240]. Zusätzlich kann eine Fokuskorrektur durch eine sphärische Verformung der Linsenoberfläche durchgeführt werden. Das neuartige Design der piezoelektrisch aktuierten Viersektoren-Mikrolinse ermöglicht somit erstmalig eine integrierte Fokus- und Wellenfrontkorrektur. Somit ist die Anforderung an die verstimmbare Mikrolinse, eine kontrollierte sphärische und asphärische Verformung der Linsenoberfläche zu gewährleisten (siehe Kapitel 3.1, Anforderung 1), erfüllt.

In diesem Kapitel wurde die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte erste Mikrolinsenvariante aus einer unimorphen $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Struktur vorgestellt. Die elastischen und optischen Eigenschaften der Einzel- und Heterostrukturen wurden aufgezeigt und die mikrotechnologische Herstellung der verstimmbaren $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen detailliert beschrieben. Anschließend wurde mithilfe elektromechanischer und optischer Charakterisierung der Multisegment- $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen demonstriert, dass das neuartige Mikrolinsendesign erstmalig eine integrierte Fokus- und Wellenfrontkorrektur ermöglicht. Im nächsten Kapitel wird die zweite Mikrolinsenvariante aus AlN und NCD vorgestellt.

6 AIN/NCD-Mikrolinse

Dieses Kapitel befasst sich mit der Entwicklung von verstimmbaren Mikrolinsen basierend auf einer Schichtkombination aus Aluminiumnitrid und nanokristallinem Diamant. Die AIN-Schicht stellt hierbei die piezoelektrische und die NCD-Schicht die elastische Schicht dar. Durch die herausragenden mechanischen Eigenschaften des Diamanten soll v. a. die mechanische Stabilität der verstimmbaren Mikrolinse erhöht werden. Die Kombination von elastischen NCD-Schichten mit AIN-Piezoaktoren ermöglicht den Einsatz der Bauelemente bei hohen Temperaturen und Frequenzen.

Die ersten starren Diamantlinsen wurden bereits 1824 von Andrew Pritchard hergestellt [241] und aufgrund des hohen Brechungsindex von $n = 2,42$ in Mikroskopen eingesetzt. Seit der Entwicklung der CVD-Techniken zur Herstellung von flachen Diamantwafern existiert heutzutage eine Vielzahl an Diamant-Mikrooptiken [242–247]. Diamant hat hervorragende elektrische und thermische Eigenschaften und ist transparent vom infraroten bis in den ultravioletten Spektralbereich. Adaptive Diamantlinsen sind jedoch in der Literatur bisher nicht bekannt.

Am Anfang dieses Kapitels wird das Design der AIN/NCD-Multisegment-Mikrolinse und die Eigenschaften des Diamanten aufgezeigt. Im Anschluss daran wird die Herstellung der Einzelschichten sowie der unimorphen AIN/NCD-Gesamtstruktur dargestellt. Der nächste Teil dieses Kapitels befasst sich mit der Charakterisierung der mechanischen und optischen Eigenschaften der Einzel- und Heterostrukturen und der Eignung der unimorphen AIN/NCD-Struktur für verstimmbare Mikrolinsen. Anschließend soll mithilfe eines elektromechanischen Modells die theoretisch mögliche Linsenwirkung simuliert werden, bevor die Wirkungsweise der AIN/NCD-Mikrolinse elektromechanisch mittels WLI und LDV charakterisiert wird. Zum Schluss dieses Kapitels soll anhand eines optischen Modells die theoretisch mögliche optische Wirkung der verstimmbaren Mikrolinse demonstriert werden.

6.1 Design der AIN/NCD-Multisegment-Mikrolinse

Die Multisegment-Mikrolinse besteht aus einer unimorphen AIN/NCD/B-NCD-Membran. Die AIN-Schicht stellt hierbei die piezoelektrische und die NCD- sowie die Bor-dotierte NCD-Schicht (B-NCD) die elastische Schicht dar. Bei dieser Mikrolinse fungiert die B-NCD-Schicht zusätzlich als obere transparente Elektrode. Abbildung 6.1 zeigt den schematischen Aufbau und die Heterostruktur der AIN/NCD-Mikrolinse.

Die Basis der Linse bildet, wie bei der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse, ein 500 µm dicker Si-Chip. Auf dem Si-Chip wurde eine 300 nm dicke AIN-Schicht und anschließend eine NCD-Schicht mit einer Schichtdicke von 150 nm aufgebracht. Zusätzlich wird eine 150 nm dünne B-NCD-Schicht auf die NCD-Schicht abgeschieden, welche die transparente obere Elektrode darstellt. Ein Vorteil dieses Schichtaufbaus ist, dass der Diamant die obere Schicht darstellt und deshalb nicht durch einen zusätzlichen, aufwendigen Arbeitsschritt poliert werden muss [248]. Da die mechanische Stabilität der Membran durch die Verwendung von Diamant deutlich erhöht wird, kann die Gesamtdicke der Mikrolinse auf 0,6 µm reduziert

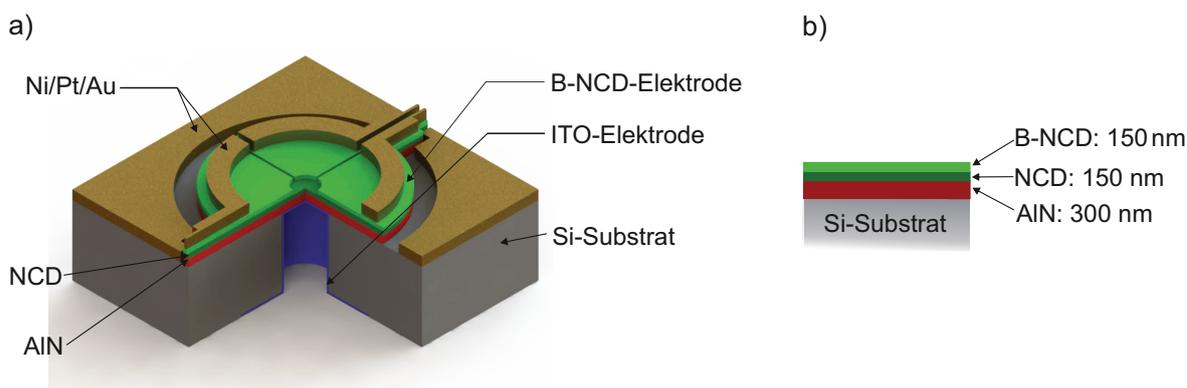


Abbildung 6.1: a) Schematischer Aufbau und b) Heterostruktur der verstimmbaren unimorphen AIN/NCD/B-NCD-Mikrolinse. Die B-NCD-Elektrode ist in vier unabhängige Segmente unterteilt. Die AIN-Schicht ist hierbei in rot, die NCD-Schicht in dunkelgrün, die B-NCD-Schicht in hellgrün und die ITO-Elektrode in blau dargestellt.

werden und Mikrolinsen mit größerem Durchmesser hergestellt werden. Die Gesamtdicke ist somit deutlich geringer als die Dicke der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse mit 1,1 µm. Die Reduzierung der Gesamtdicke ermöglicht die Herstellung von Mikrolinsen mit optimierter Wirkung. Bei der AIN/NCD-Mikrolinse dient eine 50 nm dünne ITO-Schicht als untere Elektrode. Diese wird nach dem Freilegen der Membranen auf die Rückseite des Substrates aufgebracht. Die elektrische Kontaktierung der B-NCD- und der ITO-Elektrode wird mittels Nickel/Platin/Gold-Kontaktverstärkungen realisiert. Um eine asphärische Verformung zu gewährleisten wird die obere B-NCD-Elektrode in vier unabhängige Sektoren unterteilt. Hierfür werden vier dünne Gräben in die B-NCD-Schicht geätzt. Des Weiteren wird die B-NCD-Schicht geöffnet, damit der piezoelektrische AIN-Aktor optimal angesteuert werden kann.

6.2 Eigenschaften von Diamant

Diamant besitzt, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, herausragende physikalische Eigenschaften und von allen natürlichen Stoffen die höchste mechanische Härte aufgrund der starken kovalenten Bindungen und des geringen Atomabstands im Diamantgitter. Dies macht den Diamanten für eine Vielzahl von Anwendungen besonders attraktiv.

Diamant und Graphit sind Kohlenstoffallotrope, welche sich deutlich in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften unterscheiden [250]. Der Graphit ist bei Normaldruck und Temperaturen unterhalb von 4000 K die thermodynamisch stabilere Phase des Kohlenstoffs, wie im Phasendiagramm des Kohlenstoffs (Abbildung 6.2) zu erkennen ist. Erst bei hohen Temperaturen und Drücken ist der Diamant die thermodynamisch stabilere Modifikation des Kohlenstoffs (HPHT, engl.: *high-pressure high-temperature*). Natürlicher Diamant bildet sich im Erdinnern in Tiefen von 150 - 200 km, wo Temperaturen von über 1000 °C und Drücke über 5 GPa herrschen. Durch Vulkanismus gelangen sie in oberflächennahe Erdschichten [251]. 1955 gelang es General Electrics, erstmals unter Nachbildung dieser Bedingungen mit der HPHT-Synthese synthetischen, einkristallinen Diamant herzustellen. Die Umwandlung von Graphit in Diamant erfordert eine sehr hohe Aktivierungsenergie im Bereich einiger eV und findet demzufolge erst bei Temperaturen

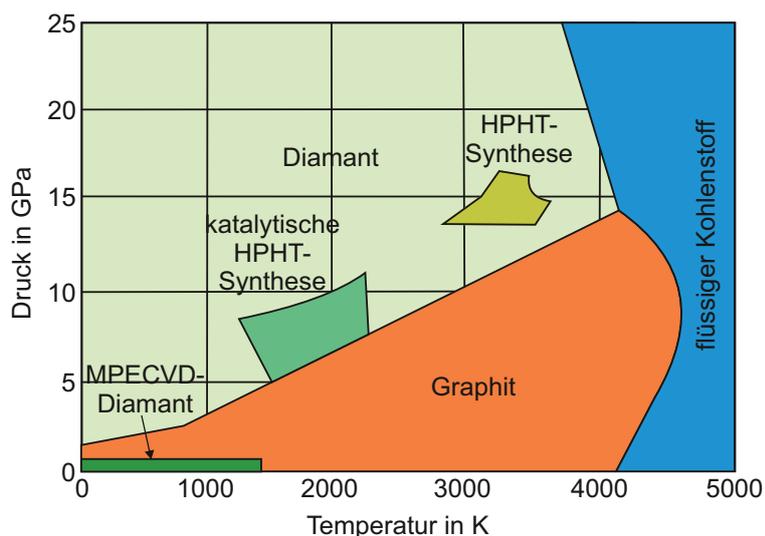


Abbildung 6.2: Phasendiagramm des Kohlenstoffs [249]

über 1500 °C und bei einem Druck von 6 GPa statt [252, 253]. Künstlicher Diamant kann seit den 1950er-Jahren nicht nur mit der HPHT-Synthese, sondern auch mittels chemischer Gasphasenabscheidung bei niedrigem Druck hergestellt werden. Der Diamant liegt hierbei in einer metastabilen Phase vor. Eine spontane Umwandlung von Diamant in Graphit findet aufgrund der hohen Aktivierungsenergie für den Phasenübergang bei Raumtemperatur nicht statt [254].

Die Kristallstruktur von Diamant (Abbildung 6.3a) besteht aus zwei kubisch-flächenzentrierten Gittern, welche um $1/4$ der Länge der Raumdiagonale gegeneinander verschoben sind. Die Gitterkonstante a beträgt $3,56 \text{ \AA}$ [210]. Die Kohlenstoffatome im Diamantgitter sind im Gegensatz zum Graphitgitter (Abbildung 6.3b) sp^3 -hybridisiert (tetraedrischen Anordnung) und besitzen eine Bindungslänge von $1,54 \text{ \AA}$. Der Diamant besitzt dadurch die höchste Volumenatomdichte aller Festkörper [255].

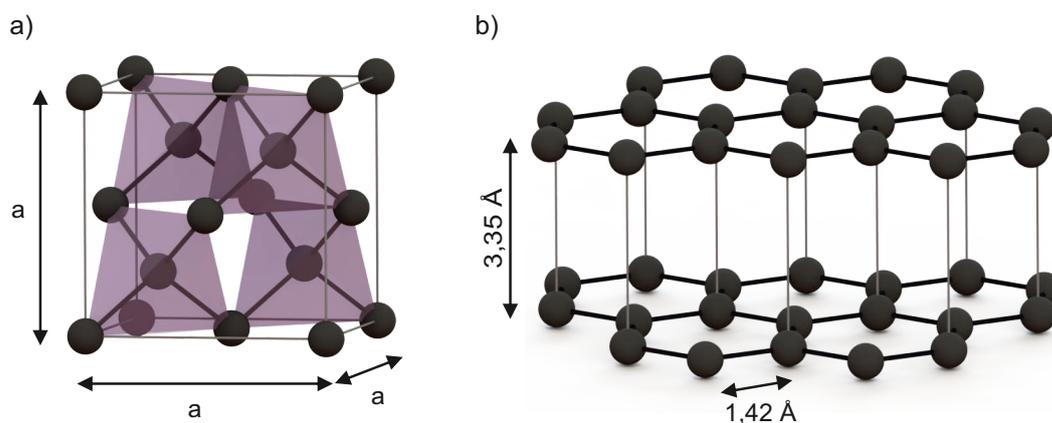


Abbildung 6.3: Kristallstruktur von a) Diamant mit den Gitterparametern $a = 3,56 \text{ \AA}$ und b) Graphit mit den Gitterparametern $1,42 \text{ \AA}$ und $3,35 \text{ \AA}$. In der Diamantstruktur sind die tetraedrischen Bindungen hervorgehoben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden nanokristalline Diamantschichten zur Herstellung von Membran-basierten Mikrolinsen verwendet, da sie viele der ausgezeichneten Eigenschaften des einkristallinen Diamanten aufweisen (siehe Tabelle 6.1) und im Gegensatz zum einkristallinen Diamant auf großen Flächen abgeschieden werden können. Bei nanokristallinem Diamant handelt es sich um polykristalline Diamantschichten mit typischen Korngrößen bis zu 100 nm. Durch eine Veränderung der Wachstumsbedingungen ist es möglich, die Korngröße und somit die Rauheit sowie andere Eigenschaften der Diamantschichten, z. B. die mechanischen Eigenschaften, über einen weiten Bereich einzustellen. Bei optimierten Wachstumsbedingungen ist der sp^2 -Anteil gering [106].

Tabelle 6.1: Vergleich der Eigenschaften von NCD-Schichten mit einkristallinem Diamant

Eigenschaft	NCD	einkristalliner Diamant
Elastizitätsmodul, E in GPa	400 – 1100 ¹	1100
Härte in kg/mm ²	8200	10000
Dichte bei 300 K, ρ in g/cm ³	3.5	3.5
Thermische Leitfähigkeit in W/cm·K	14	22
Schallgeschwindigkeit in m/s	1.7×10^4	1.7×10^4
Transmission (UV bis IR)	transparent	transparent
Referenzen	[116, 256]	[116, 141]

6.3 Nanokristalliner Diamant als transparente Elektrode

Nanokristalliner Diamant hat in jüngster Zeit große Aufmerksamkeit erregt, da NCD neben den außergewöhnlichen mechanischen und thermischen Eigenschaften, sowie der chemischen Stabilität und der hohen optischen Transparenz, die Möglichkeit besitzt durch Dotierung die Leitfähigkeit über einen weiten Bereich einzustellen. Dotierte NCD-Schichten könnten somit konventionelle, in MEMS verwendete Elektrodenmaterialien wie ITO oder Zinkoxid ersetzen [257]. Da es in den nächsten Jahren bei Indium wegen der steigenden Nachfrage zu Rohstoffengpässen kommen wird, werden alternative Materialien für transparente Elektroden gesucht [161]. Durch den zunehmenden Verbrauch von Indium insbesondere in der optoelektronischen Fertigung ist der Indiumpreis bereits kontinuierlich von 206 \$kg⁻¹ im Jahr 2000 [258], über 540 \$kg⁻¹ im Jahr 2010 [259] auf 695 \$kg⁻¹ im Jahr 2014 [260] gestiegen. Dotierte NCD-Schichten können synthetisch hergestellt werden und bieten somit eine gute Alternative zu ITO.

Undotierter, defektfreier Diamant besitzt wegen seiner großen Bandlücke von 5,47 eV selbst bei hohen Temperaturen isolierende Eigenschaften [261]. Wird der Diamant dotiert, kann er als Halbleiter verwendet werden. Als Dotierstoffe eignen sich Bor oder Phosphor. In Abbildung 6.4a sind die Dotierstoffniveaus von Bor und Phosphor im Diamant dargestellt.

¹abhängig vom sp^3/sp^2 -Anteil

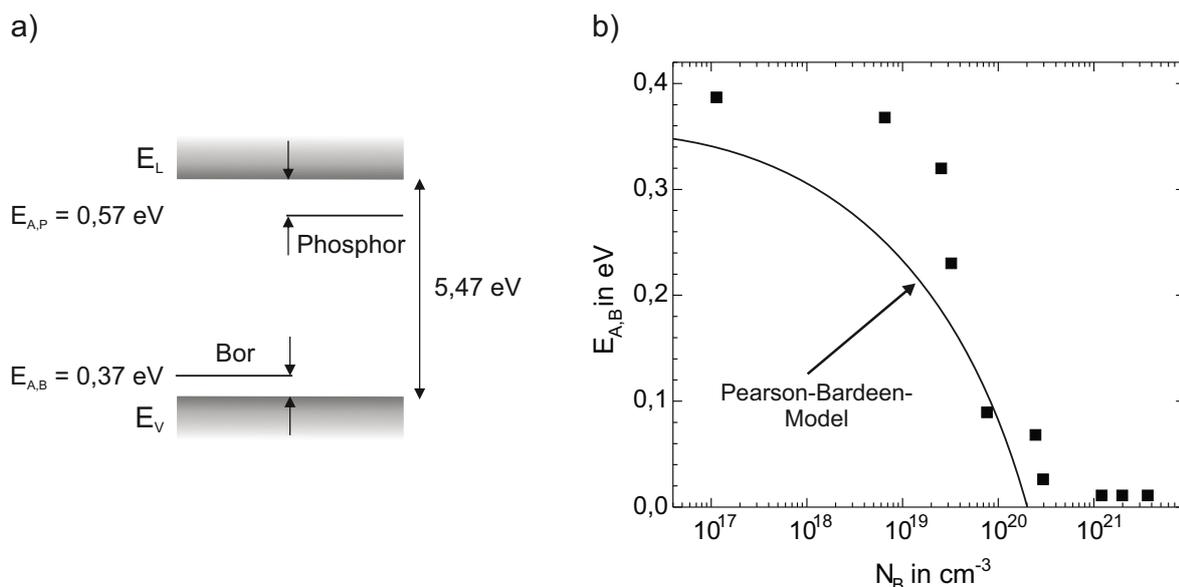


Abbildung 6.4: a) Dotierstoffniveaus von Bor und Phosphor in Diamant und b) Abhängigkeit der gemessenen Aktivierungsenergie $E_{A,B}$ von der Borkonzentration N_B in NCD-Schichten [262]

In dieser Arbeit wurden ausschließlich Bor-dotierte NCD-Schichten verwendet, weshalb auf eine Beschreibung der Phosphordotierung an dieser Stelle verzichtet wird. Das Boratom hat eine zu Kohlenstoff ähnliche Ionengröße und kann deshalb effizient in das Diamantgitter eingebaut werden. Der Einbau findet bevorzugt substitutionell statt. Bor besitzt ein Valenzelektron weniger als Kohlenstoff und bildet ein relativ flaches, diskretes Akzeptorniveau, welches sich etwa 0,37 eV oberhalb der Valenzbandkante von Diamant befindet. Bei der Dotierung mit Bor ist bei Raumtemperatur nur ein kleiner Teil der Ladungsträger aktiviert. Durch die Erhöhung der Temperatur können weitere Ladungsträger aktiviert werden. Die Aktivierungsenergie von Bor $E_{A,B}$ kann jedoch mit der zunehmenden Dotierstoffkonzentration N_B , wie in Abbildung 6.4b dargestellt, reduziert werden. Die Aktivierungsenergie E_A ist nach dem Pearson-Bardeen-Modell [263]

$$E_A = E_{A,0} - \alpha N_A^{1/3}, \quad (6.1)$$

abhängig von der Dotierstoffkonzentration N_A . $E_{A,0}$ ist hierbei die Ionisierungsenergie des Dotierstoffs und α eine Konstante mit $\alpha = 6,7 \times 10^{-8} \text{ eV/cm}$. Durch die Erhöhung von N_B nehmen die mittleren Abstände der Boratome (Störstellen) ab und es bildet sich ein Störband aus [262]. Die elektrische Leitfähigkeit wird hierbei durch den Hopping-Mechanismus beschrieben [264]. Ab einer Dotierstoffkonzentration von $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ bis $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ zeigt der nanokristalline Diamant metallisches Verhalten [262]. In NCD-Schichten kann es zu verstärktem Einbau von Boratomen an den Korngrenzen kommen, weswegen polykristalline Diamantschichten nicht die gleichen elektrischen Eigenschaften wie einkristalliner Diamant besitzen [262].

Im Rahmen dieser Arbeit werden zur Herstellung der AlN/NCD-Mikrolinsen Bor-dotierte NCD-Schichten (B-NCD) als transparente Elektroden verwendet. Zur Charakterisierung der elektronischen Eigenschaften von hochdotierten B-NCD-Schichten wurden Hall-Messungen an 150 nm dünnen B-NCD-Schichten durchgeführt, welche auf 2"-Quartzsubstraten mit den Standardprozessparametern (siehe Tabelle 6.2) abgeschlossen wurden. Dabei wurde die

Borkonzentration bei der Abscheidung der B-NCD-Schichten variiert. Zur Bordotierung der NCD-Schichten wurde Trimethylboran $B(CH_3)_3$ (TMB) verwendet, welches dem Gasgemisch im CVD-Reaktor während des Abscheidungsprozesses zugegeben wurde. Gasförmige Dotierstoffe haben den Vorteil, dass die Dotierstoffmenge und damit die Dotierstoffkonzentration in der Gasphase sehr genau über einen Massendurchflussregler (engl. *mass flow controller*) eingestellt werden kann. Die jeweilige Borkonzentration in den hergestellten 150 nm dünnen Schichten wurde nach dem Wachstum mit der Sekundärionen-Massenspektrometrie bestimmt [265]. Die ermittelten Borkonzentrationen liegen im Bereich von $7.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ bis $2.4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$.

Für die Messung der Leitfähigkeit und des Hall-Effektes wurden Ti/Pt/Au-Kontakte (20/20/200 nm) nach der Kontaktanordnung von van der Pauw [266] auf die B-NCD-Schichten aufgebracht und die Messungen mit einem Hallmessplatz der Firma Lake Shore Cryotronics im Bereich von 300 bis 800 K durchgeführt. Da die Löchermobilität bei Raumtemperatur in NCD-Schichten unter $1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ liegt, wird ausschließlich die spezifische Leitfähigkeit betrachtet [257].

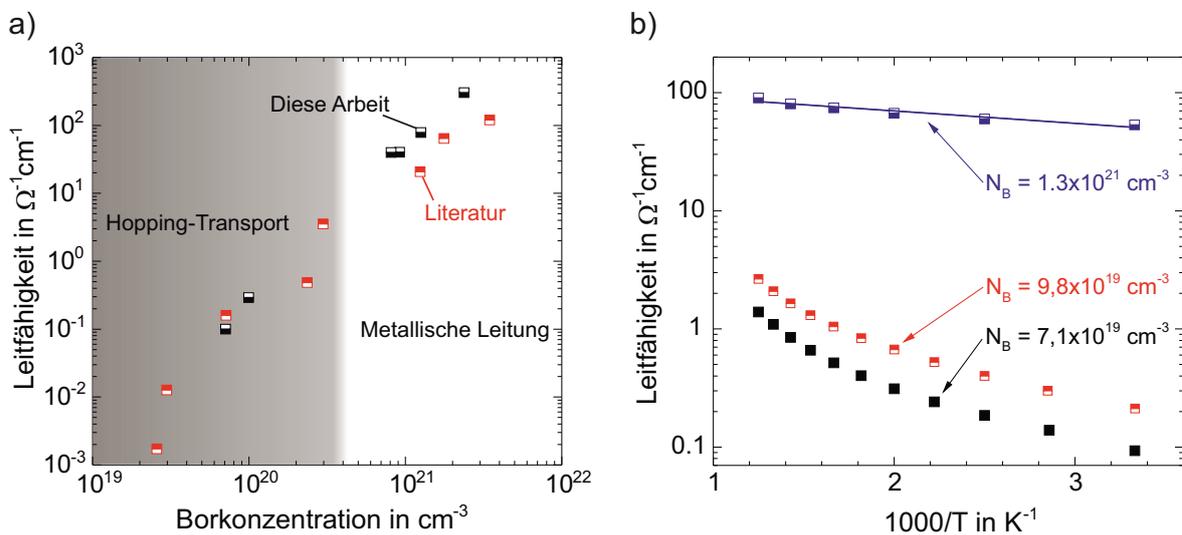


Abbildung 6.5: a) Abhängigkeit der Leitfähigkeit von Bor-dotierten NCD-Schichten von der Borkonzentration (N_B) und b) Arrhenius-Diagramm für B-NCD-Proben mit unterschiedlichen N_B

Abbildung 6.5a zeigt die Leitfähigkeit der hergestellten B-NCD-Schichten bei Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Borkonzentration. Als Vergleich wurden Literaturwerte von Gajewski et al. [262] in rot eingetragen. Die Leitfähigkeit der hergestellten B-NCD-Schichten steigt mit zunehmender Borkonzentration an und stimmt gut mit den Literaturwerten überein. Bei einer Dotierstoffkonzentration von $7.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ hat der nanokristalline Diamant bei 300 K einen spezifischen Widerstand von 5 - 10 Ωcm . Dieser kann mit einer Dotierstoffkonzentration von 10^{21} cm^{-3} bis auf 20 $\text{m}\Omega\text{cm}$ reduziert werden. Zusätzlich wurde die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit für die B-NCD-Schichten bestimmt. Abbildung 6.5b zeigt die spezifische Leitfähigkeit als Funktion der inversen Temperatur für B-NCD-Schichten mit unterschiedlichen Borkonzentrationen. Die thermisch aktivierte Leitfähigkeit $\kappa(T)$ in Halbleitern wird durch die Arrhenius-Gleichung beschrieben:

$$\kappa(T) = \kappa_0 \exp\left(-\frac{E_A}{kT}\right). \quad (6.2)$$

Hierbei ist E_A die Aktivierungsenergie, T die absolute Temperatur und k die Boltzmann-Konstante. Der Verlauf der Kurven für Borkonzentrationen von $N_B = 7.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ und $N_B = 9.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ sind nicht linear. Dieses Leitungsverhalten wird als *variable range hopping* (VRH) bezeichnet. Die Temperaturabhängigkeit dieser Leitung ist gegeben durch [267]

$$\kappa(T) = \kappa_0 \exp\left(-\left[\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{d+1}}\right). \quad (6.3)$$

Der Verlauf der Kurven entspricht einer Temperaturabhängigkeit der Form $\kappa \propto (1/T)^{-1/4}$, woraus sich $d \approx 3$ ergibt. Dies deutet auf ein dreidimensionales VRH-Leitungsverhalten hin. Bei einer hohen Dotierstoffkonzentration von $N_B = 1.3 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ist ein Übergang zu metallischem Verhalten zu beobachten. Aus der linearen Steigung der Kurve kann die Aktivierungsenergie $E_{A,B}$ bestimmt werden. Diese wurde in dem Arrhenius-Diagramm (Abbildung 6.5b) durch die lineare Approximation der Messdaten im Bereich oberhalb von 330 K zu 9 meV bestimmt und liegt somit über der zu erwartenden Aktivierungsenergie nach Gleichung 6.1. Ein Grund hierfür könnte eine an den Korngrenzen im polykristallinen Material vorhandene Potentialbarriere sein [262].

6.4 Herstellung der Dünnschichten

Die ersten Versuche, synthetischen Diamant mittels chemischer Gasphasenabscheidung bei niedrigem Druck herzustellen, gehen bis in die Mitte der 50er Jahre zurück. Den Durchbruch von CVD-Diamant gelang der russischen Forschergruppe um Derjaguin 1976. Derjaguin et al. zeigten erstmals das Diamantwachstum auf Fremdsubstraten in einer wasserstoffreichen Atmosphäre [268,269]. Seit der ersten Übersetzung in englischer Sprache 1981 von Spitsyn et al. [270] wurde die CVD-Abscheidung von Diamant intensiv erforscht und steht seit dem Ende der 80er Jahre, als eine japanische Forschergruppe erstmalig Abscheideraten von $> 1 \text{ } \mu\text{m/h}$ erzielte [271], für industrielle Anwendungen zur Verfügung. Das Diamantwachstum mithilfe CVD findet in einer kohlenstoffhaltigen Atmosphäre mit hoher Wasserstoffkonzentration statt. Der atomare Wasserstoff als Ätzgas unterdrückt die Abscheidung graphitischer Phasen, da Graphit eine deutlich höhere Ätzrate als die Diamantphase aufweist, und begünstigt durch die Stabilisierung des sp^3 -hybridisierten Kohlenstoffs das Diamantwachstum [272]. Die Gase können entweder thermisch in einem Heißdraht-CVD-Reaktor (engl.: *hot filament CVD*) [273] oder mit Hilfe eines Plasmas in einem Mikrowellen-Plasma-unterstützten CVD-Reaktor (MPECVD, engl.: *microwave plasma enhanced chemical vapour deposition*) [255] aktiviert werden. Die in dieser Arbeit verwendeten NCD-Dünnschichten werden mittels MPECVD hergestellt. Aus diesem Grund wird auf die Beschreibung des Heißdraht-CVD-Verfahrens verzichtet.

Zur Herstellung von ein- und polykristallinen Diamantschichten wurde am Fraunhofer IAF ein MPECVD-Reaktor entwickelt (Abbildung 6.6), der die Abscheidung von homogenen polykristallinen Diamantschichten bis auf 6" ermöglicht [274]. Dieser MPECVD-Reaktor besteht aus einem ellipsoidförmigen Hohlraum. Die Mikrowellenstrahlung wird hierbei durch einen Wellenleiter vom Generator zum Reaktor geleitet und am oberen Brennpunkt des Ellipsoids eingekoppelt. Die eingekoppelte Mikrowellenstrahlung wird an den Ellipsoidwänden reflektiert und aufgrund der Rotationssymmetrie im unteren Brennpunkt fokussiert. Ab einem

a)



b)

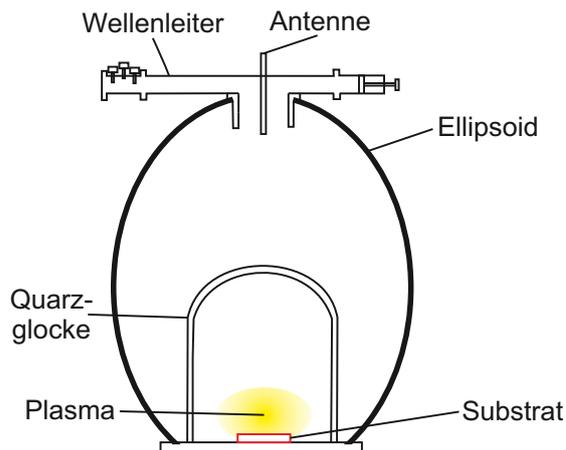
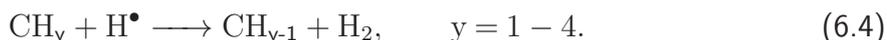


Abbildung 6.6: a) Foto und b) schematische Darstellung eines rotationssymmetrischen MPECVD-Ellipsoidreaktors

Druck von 5 - 10 mbar ist die Feldstärke hoch genug, um ein Plasma im unteren Brennpunkt zu zünden. Das zu überwachende Substrat und die Prozessgase befinden sich innerhalb einer Quarzglocke. Der Ellipsoidreaktor wird bei einer Frequenz von 2,45 GHz betrieben und erlaubt eine maximale Mikrowellenleistung von 6 kW. Die Vorteile des ellipsoidförmigen Reaktors gegenüber kommerziell erhältlichen zylindrischen MPECVD-Reaktoren sind die Größe der Abscheidefläche, die Langzeitstabilität des Plasmas und dass sich dieses aufgrund der Verteilung des elektrischen Feldes im Ellipsoidreaktor nur in der Nähe des Substrates befindet und somit Kontaminationen minimiert [274].

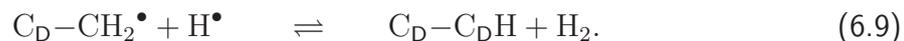
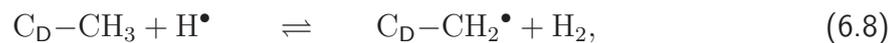
Als Prozessgase zur Herstellung von Diamantschichten dienen Methan (CH_4) als Kohlenstoffquelle und Wasserstoff (H_2). Durch eine Dissoziation der Wasserstoffmoleküle im Plasma (3000 K) entsteht atomarer Wasserstoff [275]. Der atomare Wasserstoff reagiert mit den Methanmolekülen zu verschiedenen Methylradikalen [276]:



Neben dem für das Diamantwachstum wichtigen Methylradikal CH_3^\bullet entstehen auch längerkettige Kohlenwasserstoffverbindungen C_xH_y [277]. Einige Methylradikale und Wasserstoffatome erreichen bevor sie zu H_2 und CH_4 rekombinieren die Substratoberfläche. Die wichtigsten Reaktionsgleichungen an der Substratoberfläche sind nach dem vom Butler et al. entwickelten Wachstumsmodell [275, 278]:



C_D stellt hierbei ein sp^3 -hybridisiertes Kohlenstoffatom dar. Zu Beginn muss die mit Wasserstoff abgesättigte Diamantoberfläche aktiviert werden (C_D^\bullet), bevor ein Methylradikal an der Diamantoberfläche angelagert werden kann. Um das Kohlenstoffatom vollständig in die Diamantoberfläche einzubauen müssen noch zwei weitere Bindungen ausgebildet werden [276]:



Hierfür müssen zum einen zwei Wasserstoffatome vom Methylradikal mit Hilfe des atomaren Wasserstoffs entfernt werden und zum anderen freie Oberflächenbindungen in der Umgebung zur Verfügung stehen. Um hauptsächlich sp^3 -hybridisierte Kohlenstoffatome in das Diamantgitter einzubauen und somit qualitativ hochwertige Diamantschichten herzustellen, ist eine hohe atomare Wasserstoffkonzentration notwendig, welche durch die geeignete Wahl der Prozessparameter gewährleistet werden kann. Im polykristallinen Diamanten lagern sich sp^2 -hybridisierte Kohlenstoffatome an den Kongruenzen an [256].

Für die Herstellung der AlN/NCD-Mikrolinsen wurden zu Beginn 300 nm dicke AlN-Schichten mit Hilfe der reaktiven Hochfrequenz-Magnetronspalteranlage CS730S der Firma von Ardenne mit den Standardprozessparametern (siehe Tabelle 4.1) wie in Kapitel 4.3 beschrieben auf einem hochleitenden 3"-Si(100)-Substrat mit einem spezifischen Widerstand von 0,1 - 0,2 Ωcm hergestellt.

Im nächsten Schritt wurden nanokristalline Diamantschichten mit einer Schichtdicke von 150 nm auf die AlN/Si-Substrate aufgebracht. Um Diamantschichten auf Fremdsubstraten abscheiden zu können, müssen Diamantkeime auf dem Substrat gebildet werden. Üblicherweise geschieht dies durch eine Vorbehandlung der Substrate. Werden die Fremdsubstrate ohne Vorbehandlungen den Wachstumsbedingungen im MPECVD-Reaktor ausgesetzt, bilden sich die Diamantkeime nur sehr langsam und mit geringer Dichte. Dabei findet die Keimbildung über eine diamantähnliche Kohlenstoffschicht (DLC engl.: *diamond-like carbon*), über ein Carbid, welches sich mit dem Substrat bildet (z. B. SiC bei Verwendung eines Si-Substrates) oder über eine aus amorphem Kohlenstoff bestehenden Zwischenschicht statt. Ohne Vorbehandlung werden typischerweise Keimdichten von 10^3 cm^{-2} bis 10^5 cm^{-2} erzielt. Mit dieser geringen Keimdichte ist es allerdings nicht möglich, geschlossene, homogene dünne Diamantschichten herzustellen. Um die Keimdichte zu erhöhen, müssen die Fremdsubstrate vorbehandelt werden. Hierbei werden üblicherweise Diamantimpfkeime sehr geringer Größe auf das zu überwachsene Substrat aufgebracht. Je nach Substrat und Vorbehandlungsmethode liegen die Nukleationsdichten N_d zwischen 10^3 cm^{-2} und 10^{11} cm^{-2} . Zur Herstellung dünner qualitativ hochwertiger NCD-Schichten ist eine hohe Nukleationsdichte nötig. Zu den Vorbehandlungsmethoden zählen u. a. die Ionenimplantation ($N_d = 10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-2}$), das Schleifen bzw. Ankratzen der Oberfläche ($N_d = 10^6 - 10^{10} \text{ cm}^{-2}$), die ultraschallgestützte Bekeimung mit Diamantpulver mit Korngrößen im Bereich von 0,25 μm bis 40 μm ($N_d = 10^7 - 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) oder die spannungsunterstützte Bekeimung (BEN, engl.: *bias-enhanced nucleation*, $N_d = 10^8 - 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) [279]. Durch die teilweise geringen Nukleationsdichten und die Verwendung unterschiedlich großer Diamantkeime, welche zu einem unregelmäßigen Schichtwachstum führen, sind diese Vorbehandlungsmethoden zur Herstellung ultradünner NCD-Schichten für MEMS nicht geeignet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine alternative Methode zur Bekeimung der AlN/Si-Substrate gewählt, welche von Williams et al. entwickelt wurde [256, 280]. Mit dieser Methode ist es möglich, hohe Nukleationsdichten bis zu 10^{12} cm^{-2} mit Diamantpartikeln kleiner als 10 nm zu realisieren. Durch die hohen Nukleationsdichten können geschlossene NCD-Schichten bereits bei einer Schichtdicke von 40 nm erreicht werden [281]. Als Diamantpartikel für diese Bekeimungsmethode dient ein Nanodiamantpulver der Firma

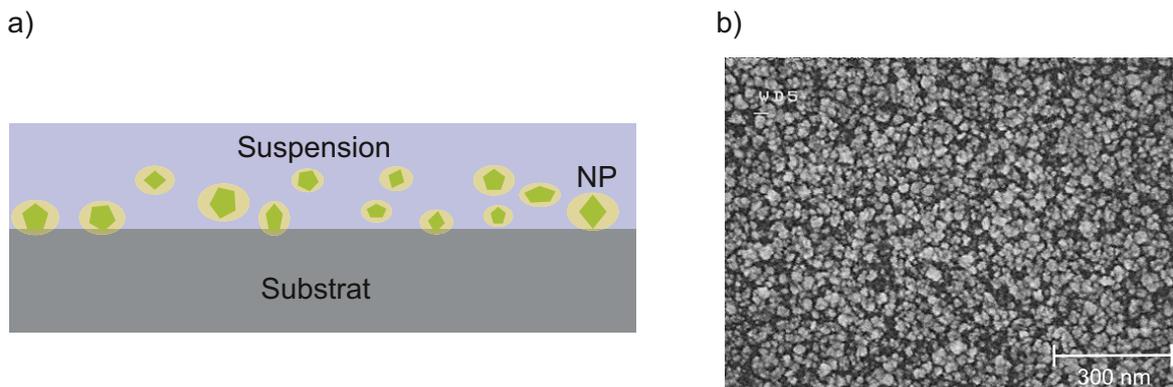


Abbildung 6.7: Schematische Darstellung a) der Bekeimung des Substrates mit nanokristallinen Diamantpartikeln (NP) [265] und b) REM-Aufnahme einer AlN-Schicht nach der Bekeimung und kurzem Überwachsen (12 Minuten) der NP

PlasmaChem GmbH mit 100 nm großen Aggregaten. Durch Tempern dieses Diamantpulvers in Wasserstoff oder Sauerstoff werden die Aggregate in $\approx 3 - 5$ nm kleine Nanodiamantpartikel aufgebrochen und deren elektrisches Potential an der Abscherschicht der bewegten Partikel, das sogenannte Zeta-Potential, eingestellt. Anschließend werden die Nanodiamantpartikel in Wasser dispergiert. Durch Hochleistungs-Ultraschall und Zentrifugation dieser Dispersion entstehen monodisperse Nanodiamant-Kolloide, welche eine hohe Langzeitstabilität aufweisen. Vor der Bekeimung der AlN-Schichten werden die AlN/Si-Substrate für kurze Zeit zur Reinigung in Flusssäure getaucht und anschließend in die Suspension mit Diamantpartikel gelegt (Abbildung 6.7a). Die Diamantpartikel werden hierbei rein elektrostatisch gebunden. Um eine möglichst gleichmäßige Bekeimung der AlN-Oberfläche zu gewährleisten, findet diese in einem Ultraschallbad statt [280]. Zur Charakterisierung der Nukleationsdichte wurde ein bekeimtes AlN/Si-Substrat für 12 Minuten mit den Standard-Prozessparametern (siehe Tabelle 6.2) mittels MPECVD überwachsen und die Morphologie anschließend mit einem REM *SUPRA 55VP* der Firma Carl Zeiss untersucht (Abbildung 6.7b). Mit dieser Bekeimungsmethode konnte eine sehr hohe Nukleationsdichte bis zu 10^{12} cm^{-2} erreicht werden. Des Weiteren ist eine sehr geringe Größenverteilung der Diamantpartikel zu erkennen. Diese homogene und dichte Verteilung der Diamantpartikel bietet eine optimale Voraussetzung für die Herstellung von qualitativ hochwertigen NCD-Schichten.

Tabelle 6.2: Standard-Prozessparameter für die Herstellung von NCD-Dünnschichten auf AlN/Si-Substraten

Parameter	Wert
Methankonzentration in %	1 – 2
Mikrowellenleistung in kW	2 – 3
Druck in mbar	25 – 30
Wachstumsrate in nm/h	≈ 50
Wachstumstemperatur in °C	600 – 700

Zur Herstellung der AlN/NCD-Mikrolinsen wurden die AlN/Si-Substrate nach der Bekeimung in die MPECVD-Anlage geschleust und das Diamantwachstum gestartet. Die Prozessparameter zur Herstellung von 150 nm dünnen NCD-Schichten auf AlN/Si-Substraten sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

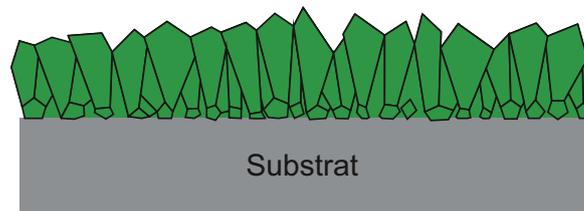


Abbildung 6.8: Schematische Darstellung des NCD-Wachstums [282]

Zu Beginn des Wachstums wird eine Methankonzentration von 4 % gewählt, um ein ungewolltes Ätzen der Diamantpartikel zu vermeiden [256]. Die Kristallgröße, die Rauheit und der E-Modul hängen stark vom Methangehalt während des Wachstums ab [256,283]. Da diese umso größer sind je weniger Methan während des Diamantwachstums zugegeben wird, wurde die Methankonzentration nach der Startphase auf 1 - 2 % reduziert und während des Wachstums konstant gehalten. Die Konzentration an Wasserstoff betrug somit 98 - 99 %. Beim Wachstum nanokristalliner Diamantschichten dienen die aufgebrachtten Diamantkeime als Startpunkt für das Diamantwachstum, welches schematisch in Abbildung 6.8 dargestellt ist. Dabei werden einzelne Kristalle mit kleinerer Wachstumsgeschwindigkeit von den Kristallen, deren Wachstumsrichtung senkrecht zur Oberfläche am größten ist nach dem Van Der Drift-Modell überwachsen [284]. Für eine detaillierte Beschreibung der Bekeimung und des NCD-Wachstums auf AlN/Si-Substraten sei auf [265, 285] verwiesen.

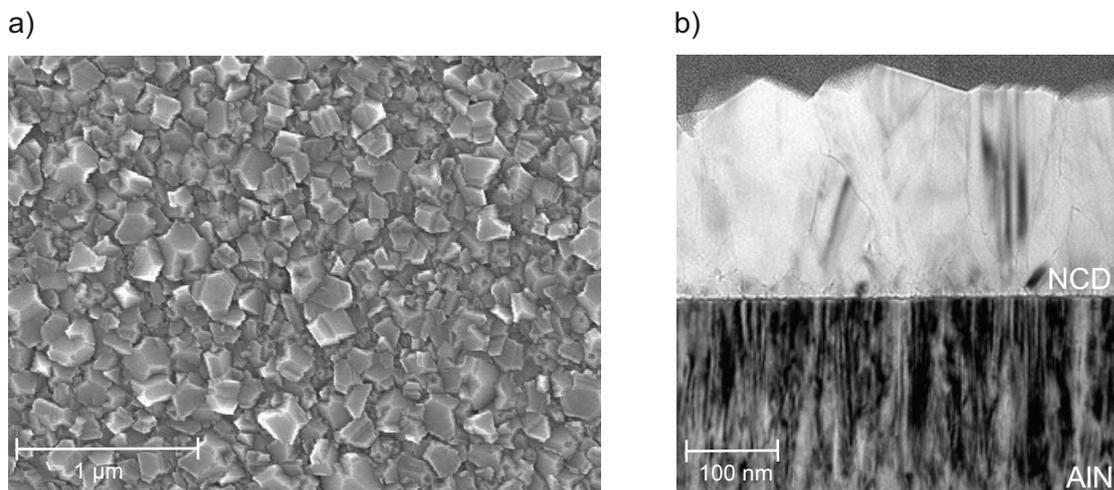


Abbildung 6.9: a) REM-Aufnahme einer 150 nm dünnen NCD-Schicht und b) TEM-Aufnahme [281] einer 200 nm dicken NCD-Schicht auf einem AlN/Si(100)-Substrat. Die AlN-Schicht hat eine Schichtdicke von 200 - 300 nm.

Die Morphologie der hergestellten $\approx 150 - 200$ nm dünnen NCD-Schichten wurde nach dem Wachstum auf AlN mit einem Rasterelektronenmikroskop und der Schichtstapel mit einem hochauflösendem Transmissionselektronenmikroskop (TEM) charakterisiert (Abbildung 6.9). Die TEM-Aufnahmen wurden am Fraunhofer IWM in Halle durchgeführt.

In den Aufnahmen sind die einzelnen, einige Nanometer großen Diamantkristallite der NCD-Schicht deutlich sichtbar. Die Korngrößen der NCD-Schicht liegen im Bereich von 100 nm bis 200 nm und die RMS-Rauheit beträgt 14 nm. Die Verteilung der NCD-Schichtdicke über den gesamten 3"-Wafer wurde mittels Ellipsometriemessungen bestimmt. Die Schichthomogenität von 150 nm dünnen NCD-Schichten beträgt $\pm 10\%$.

Die Kristallqualität der hergestellten NCD-Schichten wurde mittels Ramanspektroskopie untersucht, welche eine weit verbreitete Technik in der Charakterisierung von kohlenstoffhaltigen Materialien wie Diamant, Graphit oder Graphen darstellt [286]. Die Ramanspektroskopie beruht auf der inelastischen Streuung von monochromatischem Licht an Materie. Für eine detaillierte Beschreibung des Raman-Effekts in Kristallen sei auf [210] verwiesen. Das ramanaktive Phonon des Diamantkristalls ist das dreifach entartete optische Phonon am Γ -Punkt der Brioullinzone, welches eine Energie von etwa 1332 cm^{-1} aufweist und im folgenden als Diamantramanlinie bezeichnet wird [287]. Die Breite der Diamantramanlinie liefert Informationen über die Größe und die Qualität der Diamantkristalle [288]. Die Position der Diamantramanlinie gibt zudem Aufschluss über den Verspannungszustand im kristallinen Material. Ist eine Verspannung vorhanden, ändern sich die Frequenzen der Phononen aufgrund der veränderten Gleichgewichtslage der Atome. Es kommt zu einer Verschiebung der Ramanlinie im Diamantspektrum. Hierbei deutet eine Verschiebung der Diamantramanlinie zu höheren Wellenzahlen auf eine Druckspannung hin, wohingegen eine Verschiebung zu niedrigeren Wellenzahlen auf eine Zugspannung zurückzuführen ist. Des Weiteren liefert das Ramanspektrum Informationen über die Phasenreinheit von Diamant. Sind graphitische Anteile (sp^2 -hybridisierter Kohlenstoff) vorhanden, treten weitere Ramanlinien im Spektrum auf. Hierbei wird die Ramanlinie bei 1580 cm^{-1} als G-Band (engl.: *graphite band*) und die Ramanlinie bei 1350 cm^{-1} als D-Band (engl.: *disordered graphite band*) bezeichnet. Das G-Band charakterisiert die kristalline, graphitische Struktur und das D-Band die ungeordnete Struktur des polykristallinen Graphits [287].

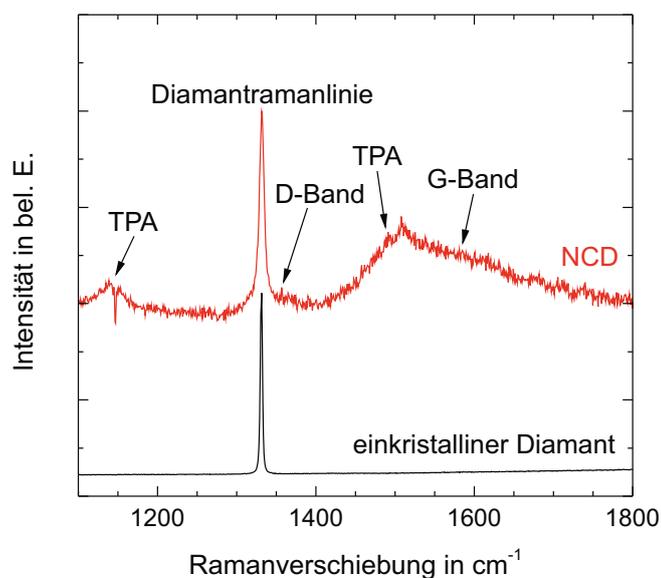


Abbildung 6.10: Ramanspektrum einer 150 nm dicken NCD-Schicht auf AlN/Si(100) und eines phasenreinen einkristallinen Diamanten

Abbildung 6.10 zeigt das Ramanspektrum einer 150 nm dünnen NCD-Schicht, die mit den in Tabelle 6.2 aufgeführten Standardprozessparametern auf ein AlN/Si(100)-Substrat abgeschieden wurde. Als Vergleich ist das Ramanspektrum eines phasenreinen unverspannten einkristallinen Diamanten der Firma Element Six Ltd. dargestellt. Die Messung wurde mit einem Ramanspektrometer *Equinox55* der Firma Bruker durchgeführt, welches eine spektrale Auflösung von $\leq 0,5 \text{ cm}^{-1}$ besitzt. Die Anregung der Ramanspektren wurde mit Hilfe eines Argonionenlasers ($\lambda = 457,94 \text{ nm}$) bei Raumtemperatur mit einer maximalen Anregungsleistung von 300 mW durchgeführt. Die Integrationszeiten pro Spektrum betragen 100 s. Das Ramanspektrum der NCD-Schicht zeigt hierbei deutlich die Diamantramanlinie bei 1332 cm^{-1} . Die Halbwertsbreite der Diamantramanlinie beträgt 7 cm^{-1} und stimmt gut mit den Literaturwerten für CVD-Diamantfilme überein [287]. Neben der Diamantramanlinie erscheint ein breites Band um 1500 cm^{-1} , welches den sp^2 -hybridisierten Kohlenstoffatomen, den graphitischen Einschlüssen, zugeordnet werden kann (D- und G-Band). Zusätzlich sind Anteile von Kohlenstoffverbindungen aus den Korngrenzen des nanokristallinen Materials bei 1150 cm^{-1} und 1480 cm^{-1} zu erkennen, welche dem trans-Polyacetylen (TPA) zugeordnet werden können [287, 289]. Die scharfe Diamantramanlinie deutet auf eine hohe Kristallqualität der NCD-Schicht auf AlN hin. Die Diamantramanlinie ist um $0,6 \text{ cm}^{-1}$ zu höheren Wellenzahlen hin verschoben, was auf eine Druckverspannung der NCD-Schicht von -580 MPa ($\sigma \simeq -0,345 \text{ GPa/cm}^{-1}$ [290]) zurückzuführen ist.

Das Si-Substrat, die AlN-Schicht und die NCD-Schicht besitzen unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten, die beim Abkühlen von der Wachstumstemperatur von $600 - 700 \text{ }^\circ\text{C}$ auf Raumtemperatur thermische Spannungen σ_{th} induzieren. Si besitzt bei Raumtemperatur einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha_{Si} = 2,6 \times 10^{-6} / \text{K}$, AlN einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha_{AlN_{\perp}} = 4,2 \times 10^{-6} / \text{K}$ und NCD einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha_{NCD} = 1 \times 10^{-6} / \text{K}$ [139, 141]. Zusätzlich entstehen intrinsische Spannungen σ_i beim Abscheiden von NCD auf AlN/Si(100). Die Eigenspannung ($\sigma_i + \sigma_{th}$) der NCD/AlN-Heterostruktur (150 nm/300 nm) über den gesamten Wafer wurde mittels Waferkrümmungs-Messungen bestimmt. Hierbei ergibt sich die Gesamtkrümmung aus der Summe der Einzelkrümmungen. Die Eigenspannung der unimorphen Struktur wurde zu $-210 \pm 25 \text{ MPa}$ (Druckspannung) ermittelt. Lokale Schichtspannungen können jedoch aufgrund der inhomogenen Stressverteilung der AlN-Schicht über den Wafer hinweg deutliche Unterschiede aufweisen.

Zur Herstellung der AlN/NCD-Mikrolinsen wurden zusätzlich 150 nm dünne B-NCD-Schichten mit den Standardprozessparametern (siehe Tabelle 6.2) auf die NCD/AlN/Si(100)-Substrate abgeschieden. Dabei wurde TMB als Dotierstoff während der Abscheidung in der MPECVD-Anlage verwendet. Für die in dieser Arbeit verwendeten unimorphen AlN/NCD/B-NCD-Schichten wurden Borkonzentration von $N_B \approx 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ gewählt, um eine hohe Leitfähigkeit der Dünnschichten bis zu $100 \text{ } \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ zu gewährleisten.

Die unimorphen Strukturen zur Herstellung von verstimmbaren Mikrolinsen müssen, gemäß den Anforderungen in Kapitel 3.1, eine hohe mechanische Stabilität und Flexibilität (siehe Anforderung 6) sowie eine Transparenz im sichtbaren Spektralbereich (siehe Anforderung 5) aufweisen. Aus diesem Grund werden in den beiden folgenden Kapiteln die elastischen und optischen Eigenschaften der Einzel- und Mehrlagenstrukturen untersucht und ihre Eignung für Membran-basierte Mikrolinsen diskutiert.

6.5 Elastizität der Einzel- und Heterostrukturen

Zur Bestimmung der elastischen Eigenschaften der AlN-, NCD- und B-NCD-Einzel- und Heterostrukturen wurde der Bulge-Test verwendet. Hierfür wurde eine 250 nm dicke AlN-Schicht auf einem 3"-Siliziumsubstrat durch Magnetronspütern mit den Standardprozessparametern (siehe Tabelle 4.1) aufgebracht. Bei der Herstellung der B-NCD/NCD/AlN-Mikrolinsen ist die AlN-Schicht während der Abscheidung der NCD-Schichten Temperaturen von 600-700 °C ausgesetzt. Aus diesem Grund wurde die 250 nm dicke AlN-Schicht nach dem AlN-Wachstum für 1 Minute bei 700 °C in einer N₂-Atmosphäre getempert. Die elastischen Eigenschaften dieser AlN-Schicht sind somit vergleichbar mit den elastischen Eigenschaften der AlN-Schicht in der B-NCD/NCD/AlN-Heterostruktur. Zusätzlich wurde eine 150 nm dünne NCD-Schicht sowie eine 150 nm dünne B-NCD-Schicht auf einem 3"-Siliziumsubstrat durch MPECVD mit den Standardprozessparametern (siehe Tabelle 6.2) abgeschieden. Bei der Herstellung der B-NCD-Schicht wurde eine Dotierstoffkonzentration von $N_B \approx 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ verwendet. Darüber hinaus wurde eine 220 nm dünne AlN-Schicht auf einem 3"-Siliziumsubstrat durch Magnetronspütern aufgebracht und eine NCD-Schicht mit einer Schichtdicke von 220 nm mittels MPECVD auf die AlN-Schicht abgeschieden. Die Eigenspannung der NCD- und B-NCD-Schicht sowie die Eigenspannung der unimorphen AlN/NCD-Struktur wurden nach dem Wachstum mittels Waferkrümmungs-Messungen bestimmt. Die Eigenspannung der NCD-Schicht, der B-NCD-Schicht und der AlN/NCD-Heterostruktur wurde zu $-160 \pm 15 \text{ GPa}$, $-312 \pm 25 \text{ GPa}$ und $-450 \pm 40 \text{ GPa}$ ermittelt. Anschließend wurden kreisrunde Öffnungen mit einem Durchmesser von 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm mittels DRIE in die Si-Wafer geätzt um freistehende AlN-, NCD-, B-NCD- und AlN/NCD-Membranen zu erhalten. Die elastischen Eigenschaften der AlN-, NCD- und B-NCD-Einzelschicht- sowie die unimorphe AlN/NCD-Membran wurden im Anschluss mit dem Bulge-Test bestimmt. Für eine ausführliche Beschreibung des Messaufbaus und der Messdurchführung sei auf Kapitel 5.3 verwiesen.

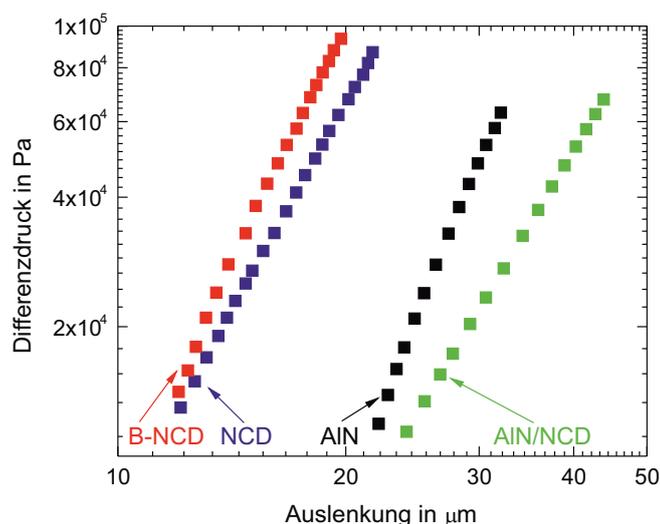


Abbildung 6.11: Druck-Auslenkungs-Kurve einer getemperten AlN-Membran (schwarz) mit $d_L = 1 \text{ mm}$ und $d = 250 \text{ nm}$, einer NCD-Membran (blau) mit $d_L = 1 \text{ mm}$ und $d = 150 \text{ nm}$, einer B-NCD-Membran (rot) mit $d_L = 1 \text{ mm}$ und $d = 150 \text{ nm}$ und einer unimorphen AlN/NCD-Membran (grün) mit $d_L = 2 \text{ mm}$ und $d_{\text{gesamt}} = 440 \text{ nm}$. Hierbei steht d_L für den Durchmesser und d für die Schichtdicke der Membran.

Abbildung 6.11 zeigt die Druck-Auslenkungs-Kurven einer getemperten AlN-Membran mit einem Durchmesser von 1 mm (schwarz), einer NCD-Membran mit einem Durchmesser von 1 mm (blau), einer B-NCD-Membran mit einem Durchmesser von 1 mm (rot) und einer unimorphen AlN/NCD-Membran mit einem Durchmesser von 2 mm (grün). Bei der Vermessung der Membranen war eine maximale Druckbelastung bis ≥ 60 kPa möglich. Dadurch konnte der E-Modul mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden. Die Eigenspannung der Einzelstrukturen sowie der unimorphen AlN/NCD-Struktur konnte mit dem Bulge-Test nicht bestimmt werden, da alle Membranen druckverspannt waren. Infolgedessen wird auf eine Darstellung der Druck-Auslenkungs-Kurven bei niedrigem Differenzdruck ($\Delta p \leq 10$ kPa) verzichtet und nur der Druckbereich gezeigt, der zur Bestimmung des E-Moduls verwendet wurde. Der E-Modul der getemperten AlN-Schicht konnte zu 320 ± 5 GPa bestimmt werden mit $\nu(\text{AlN}) = 0,24$ und ist vergleichbar mit dem E-Modul einer ungetemperten AlN-Schicht (siehe Kapitel 5.3). Der E-Modul der NCD- bzw. der B-NCD-Schicht mit $\nu(\text{NCD}) = 0,12$ beträgt 1000 ± 10 GPa bzw. 1028 ± 10 GPa und ist somit deutlich größer als der E-Modul der elastischen Si_xN_y -Schicht von 168 ± 2 GPa (siehe Tabelle 5.3). Darüber hinaus ist der E-Modul der B-NCD-Schicht um ein Zehnfaches größer als der E-Modul einer dünnen ITO-Schicht, welcher für eine 100 nm dünne ITO-Schicht von Park et al. zu 118 GPa bestimmt wurde [108]. Dieser hohe E-Modul führt dazu, dass sich der Diamant bei Einwirkung einer Belastung kaum elastisch verformt. Des Weiteren lässt sich feststellen, dass die Bor-Dotierung keinen Einfluss auf die elastischen Eigenschaften von NCD besitzt. Der ermittelte E-Modul der NCD-Schichten stimmt gut mit den Literaturwerten überein [106]. Der kombinierte E-Modul der AlN/NCD-Heterostruktur konnte zu 687 ± 12 GPa ermittelt werden. In dieser unimorphen Struktur wird die Elastizität hauptsächlich durch die herausragenden mechanischen Eigenschaften des Diamanten bestimmt. Der Bulge-Test wurde an der gleichen unimorphen AlN/NCD-Membran mehrfach wiederholt (5 Messzyklen), um die Langzeitbeanspruchung der Heterostruktur zu überprüfen. Dabei lieferte jeder Messzyklus die gleiche Druck-Auslenkungs-Kurve und somit den gleichen E-Modul. Die unimorphen Membranen aus AlN und NCD weisen demnach kein Kriechverhalten auf und sind langzeitstabil. Die ermittelten elastischen Eigenschaften der AlN-, NCD- und B-NCD-Einzelschichten sowie der AlN/NCD-Heterostruktur sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Tabelle 6.3: Zusammenfassung der mechanischen Eigenschaften der Einzel- und Heterostrukturen aus AlN und (B-)NCD. Der E-Modul und die Schichtspannung wurden mit Hilfe des Bulge-Test-Experiments und der Waferkrümmungs-Messung bestimmt.

Materialien	d in nm	E-Modul in GPa	Schichtspannung in MPa
AlN	250	320 ± 5	-
NCD	150	1000 ± 10	-160 ± 15
B-NCD	150	1028 ± 10	-312 ± 25
NCD/AlN	220/220	687 ± 12	-450 ± 40

Die unimorphen AIN/NCD-Membranen weisen eine sehr gute Elastizität und Flexibilität auf und erfüllen somit die Anforderungen an die verstimmbare Mikrolinse (Kapitel 3.1, Anforderung 6). Die herausragenden mechanischen Eigenschaften des Diamanten verstärken die mechanische Stabilität der unimorphen Struktur. Diese eignet sich daher hervorragend zur Herstellung von mechanisch-stabilen verstimmbaren Membran-basierten Mikrolinsen.

6.6 Optische Eigenschaften der Dünnschichten

Zur Charakterisierung der optischen Qualität der verwendeten Materialien wurde die optische Transmission einer unimorphen AIN/NCD/B-NCD-Membran (300/150/150 nm) mit einer Gesamtdicke von 600 nm untersucht. Die Transmissionspektren wurden mit einem UV-VIS-IR-Spektrometer im Wellenlängenbereich von 200 bis 800 nm aufgenommen.

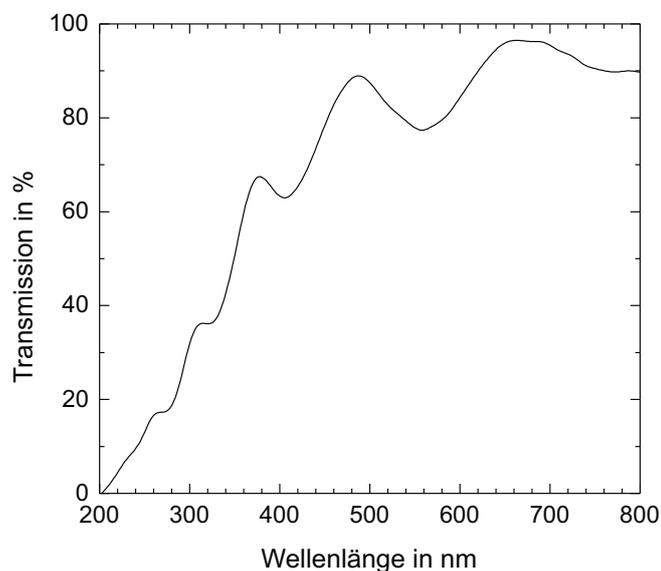


Abbildung 6.12: Optische Transmission im sichtbaren Spektralbereich einer 600 nm-dicken unimorphen AIN/NCD/B-NCD-Membran

In Abbildung 6.12 ist das Transmissionspektrum der unimorphen AIN/NCD/B-NCD-Membran dargestellt. Durch Mehrfachreflexionen an den Schichtgrenzflächen treten, wie in Kapitel 5.4 beschrieben, Interferenzeffekte auf. Die AIN/NCD/B-NCD-Heterostruktur weist über 350 nm eine Transmission von 60 - 90 % auf und erfüllt somit die Anforderung an die verstimmbare Mikrolinse (siehe Kapitel 3.1, Anforderung 5). Hochdotierter nanokristalliner Diamant kann somit als mechanisch-stabile transparente Elektrode verwendet werden und stellt eine gute Alternative zu ITO dar.

6.7 Mikrofabrikation

Die verstimmbaren AIN/NCD-Mikrolinsen wurden im Reinraum des Fraunhofer IAF sowie des Instituts für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg hergestellt. Dafür waren, wie bei der Herstellung der AIN/Si_xN_y, über 50 Prozessschritte erforderlich. Für die Herstellung der AIN/NCD-Mikrolinsen wurden ausschließlich 3"-Wafer

verwendet, was eine gleichzeitige Herstellung von 21 Bauelementen auf einem Wafer ermöglicht. Die Chipgröße beträgt, gemäß den Anforderungen in Kapitel 3.1, $12 \times 12 \text{ mm}^2$ und ermöglicht somit eine kompakte Bauweise. Für die Herstellung der verstimmbaren AlN/NCD-Multisegment-Mikrolinsen wurde das gleiche Maskenlayout (Abbildung 5.12) wie für die Herstellung der AlN/Si_xN_y-Mikrolinsen verwendet. Aus diesem Grund lässt sich die Herstellung ebenfalls in vier Ebenen aufteilen:

1. Ebene: Mesa-Ätzung
2. Ebene: Kontaktmetallisierung
3. Ebene: Strukturierung der oberen Elektrode
4. Ebene: Membranherstellung

Am Anfang wurden eine 300 nm dicke AlN-Schicht, eine 150 nm dünne NCD-Schicht und eine 150 nm dünne B-NCD-Schicht auf einem Si-Substrat, wie in Kapitel 6.4 beschrieben, abgeschieden. Zusätzlich wurde eine 200 nm dicke Si_xN_y-Schicht mittels PECVD auf die AlN/NCD/B-NCD-Mehrlagenstruktur aufgebracht, welche die Ätzmaske darstellt (Abbildung 6.13a).

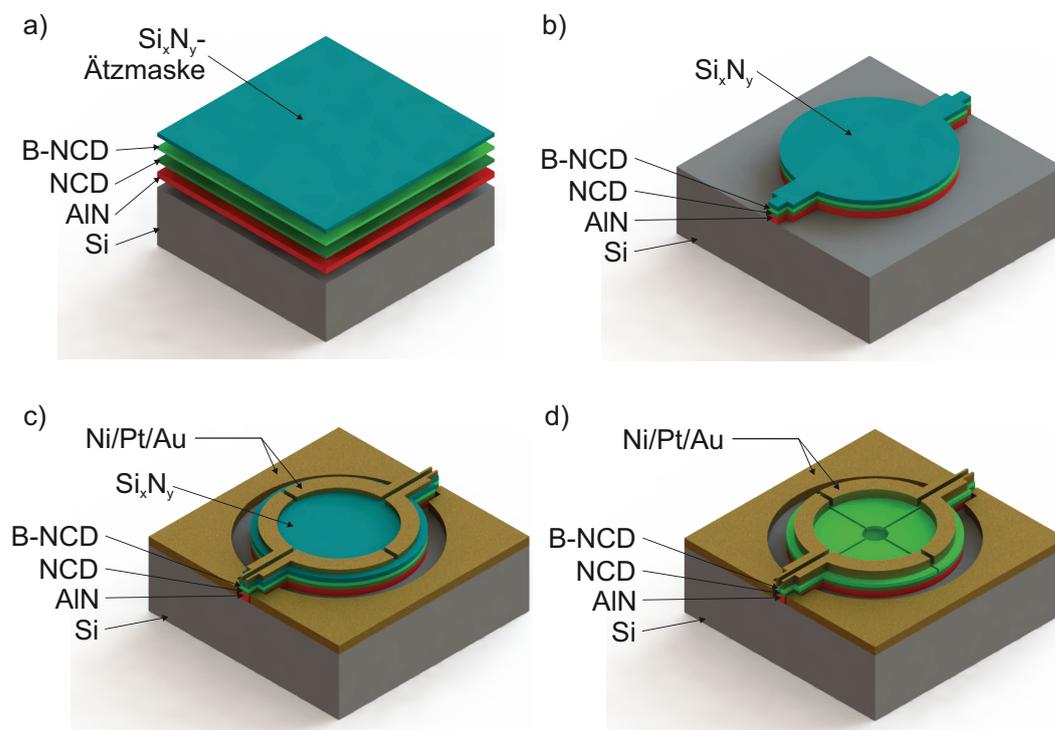


Abbildung 6.13: Herstellung der AlN-NCD-Mikrolinse: a) Abscheiden der AlN-, NCD- und B-NCD-Schicht sowie der Si_xN_y-Ätzmaske, b) Mesa-Ätzung zum Freilegen der unteren Elektrode, c) Kontaktmetallisierung der oberen und unteren Anregungselektrode und d) Strukturierung der oberen B-NCD-Elektrode. Die B-NCD-Schicht ist hierbei in hellgrün, die NCD-Schicht in dunkelgrün, die AlN-Schicht in rot und die Si_xN_y-Ätzmaske in türkis dargestellt.

1. Ebene: Mesa-Ätzung

Zu Beginn wurde die Mesa-Struktur mittels Kontaktlithographie definiert und das Si-Substrat freigelegt. Hierfür wurde die 200 nm dicke Si_xN_y -Schicht mittels RIE mit SF_6 geätzt. Anschließend wurde der restliche Photolack mithilfe von DMSO entfernt und die NCD-Schichten trockenchemisch mit einem O_2 -Plasma in einer ICP-Ätzanlage geätzt. Im Anschluss daran wurde die 300 nm dicke AIN-Schicht nasschemisch mithilfe einer wässrigen Ammoniumhydroxid-Lösung ($\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:10$) bei $\approx 50^\circ\text{C}$ geätzt. In Abbildung 6.13b ist der Chip nach der Mesa-Ätzung dargestellt.

2. Ebene: Kontaktmetallisierung

Die nächste Ebene des Frontseitenprozesses beinhaltet die Kontaktmetallisierung mittels Lift-Off-Verfahrens. Die Kontaktmetalle wurden hierbei auf die obere B-NCD-Elektrode und auf das hochleitende Si-Substrat aufgebracht. Hierfür wurde zu Beginn ein Negativlack aufgeschleudert, belichtet und entwickelt. Im nächsten Schritt wurden mittels Elektronenstrahlverdampfung 50 nm Ni als Haftvermittler sowie 150 nm Pt und 200 nm Au flächig auf die Probe aufgebracht. Im Anschluss daran wurde der Photolack entfernt und somit die geschützten Stellen freigelegt (Abbildung 6.13c).

3. Ebene: Strukturierung der oberen Elektrode

In der 3. Ebene folgte die Strukturierung der oberen B-NCD-Elektrode. Zu Beginn wurde die Si_xN_y -Ätzmaske mithilfe der Kontaktlithographie und SF_6 -Trockenätzens strukturiert. Hierfür wurden Gräben mit einer Breite von 90 μm und eine kreisrunde Öffnung in die Si_xN_y -Schicht geätzt. Die strukturierte Si_xN_y -Schicht diente im nächsten Schritt als Maske für die B-NCD-Ätzung. Im Anschluss daran wurde der Photolack mittels DMSO entfernt und die 150 nm dicke B-NCD-Elektrode mit O_2 -Plasma strukturiert. Dabei wurde die Struktur der Si_xN_y -Schicht auf die B-NCD-Elektrode übertragen. Da sich unterhalb der B-NCD-Elektrode eine NCD-Schicht befindet und somit kein Ätzstopp vorhanden ist, ist eine genaue Bestimmung der B-NCD-Schichtdicke sowie der NCD-Ätzrate notwendig, um ein Ätzen auf Zeit mit hinreichender Genauigkeit zu gewährleisten. Zum Schluss dieser Ebene wurde die Si_xN_y -Ätzmaske trockenchemisch mittels SF_6 entfernt. Abbildung 6.13d zeigt den Chip nach Beendigung des Frontseitenprozesses.

4. Ebene: Membranherstellung und Aufbringen der Rückelektrode

Die letzte Ebene beinhaltet den Rückseitenprozess. Dabei wurden kreisrunde Membranen mit einem Durchmesser von 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm mithilfe des Bosch-Prozesses hergestellt. Eine detaillierte Zusammenfassung der Prozessschritte zur Herstellung der AIN/NCD-Mikrolinsen befindet sich im Anhang in Kapitel A.2.

Nach dem Durchlaufen der vier Ebenen wurde die ITO-Rückelektrode nachträglich durch Magnetronspütern auf die Rückseite des Wafers aufgebracht.

Im Anschluss an die Prozessierung wurden die Wafer mit den AIN/NCD-Mikrolinsen in einzelne Chips mit einer Chipgröße von $12 \times 12 \text{ mm}^2$ vereinzelt, so dass jeder Chip ein Bauelement enthält. Die Chips wurden anschließend auf eine Leiterplatte geklebt und in eine

Messhalterung integriert (siehe Kapitel 5.5). Für die elektro-mechanische Charakterisierung der AIN/NCD-Mikrolinse wurde die Flüssigkeitskammer mit Luft befüllt.

6.8 Simulation der mechanischen Wirkung

Vor der Vermessung der realen Wirkungsweise der AIN/NCD-Mikrolinse wurde die elektromechanische Wirkung der Linse mit COMSOL Multiphysics 4.4 simuliert und somit die theoretisch zu erwartende Membranauslenkung bestimmt. Die COMSOL-Simulation soll exemplarisch an einer AIN/NCD-Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm dargestellt werden. Hierfür wurde zu Beginn ein Modell der AIN/NCD-Mikrolinse erstellt (Abbildung 6.14a). Dieses besteht aus einer ganzflächigen 300 nm dicken piezoelektrischen AIN-Schicht, einer 150 nm dünnen elastischen NCD-Schicht und einer 150 nm dünnen B-NCD-Schicht, welche als Elektrode fungiert (in grün dargestellt). Die B-NCD-Schicht ist in vier Sektoren aufgeteilt.

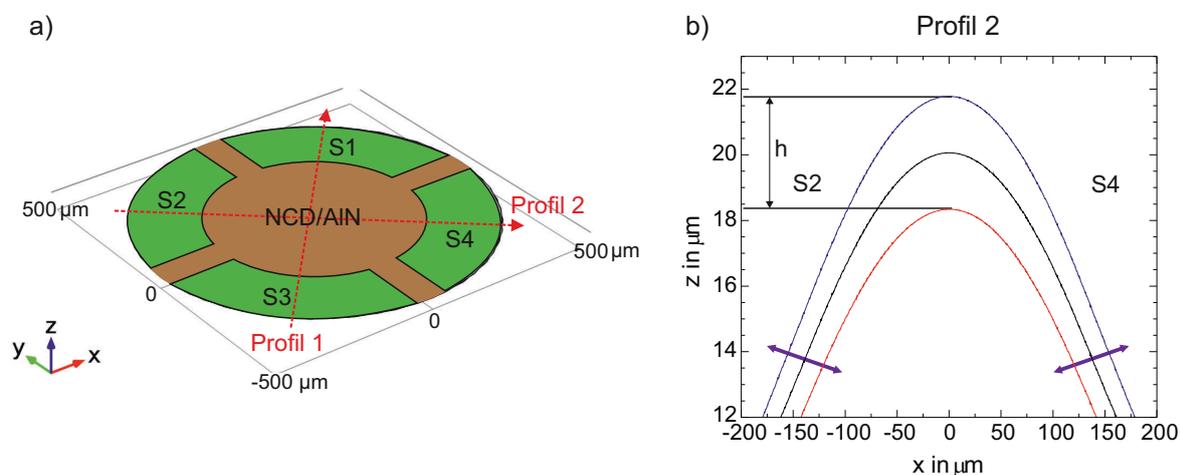


Abbildung 6.14: a) In COMSOL Multiphysics modellierte Geometrie der AIN/NCD-Mikrolinse und b) simulierte Auslenkung der AIN/NCD-Linsenmembran bei Aktuierung aller vier Sektoren mit 0 V, +20 V und -20 V

Um eine möglichst realistische Simulation der elektromechanischen Wirkung der Linse zu gewährleisten, wurden die Materialparameter der einzelnen Schichten (wie z. B. E-Modul, Dichte, d_{33} -Koeffizient) mit den in Kapitel 4.4 und Kapitel 6.5 ermittelten Werten angepasst. Für eine detaillierte Beschreibung der Durchführung der COMSOL-Simulation sei auf Kapitel 5.6 verwiesen. In Abbildung 6.14b ist exemplarisch das Querschnittsprofil 2 durch die Mitte der Sektoren 2 und 4 bei Anregung aller vier Sektoren gleichzeitig mit 0 V, +20 V und -20 V dargestellt. Da sich zwischen der B-NCD-Elektrode und dem AIN-Piezoaktor eine 150 nm dünne isolierende NCD-Schicht befindet, wirken nur $\approx 55\%$ (11 V) der angelegten Spannung auf die AIN-Schicht. Hierbei ist eine symmetrische Verformung der Membranoberfläche mit einer maximalen Membranauslenkung h von ≈ 2600 nm erkennbar. Zusätzlich wurden, wie in Kapitel 5.6, ausschließlich ein Sektor und zwei benachbarte Sektoren mit 0 V, +20 V und -20 V angeregt. Abschließend wurden zwei Sektoren 1 und 2 mit +20 V und die Sektoren 3 und 4 mit -20 V angeregt und die Querschnittsprofile der simulierten Membranauslenkung aufgezeichnet. Der Kurvenverlauf der Querschnittsprofile ist hierbei identisch mit den simulierten Profilen der AIN/Si_xN_y-Linsenmembran (siehe

Abbildung 5.22). Aus diesem Grund wird auf eine Darstellung der simulierten Auslenkung der AIN/NCD-Linsenmembran bei unterschiedlicher Ansteuerung der vier Sektoren verzichtet und lediglich die simulierten Ergebnisse der maximalen Membranauslenkung h und der lateralen Verschiebung der Membranauslenkung x_D in Tabelle 6.4 zusammengefasst. Die Simulationen haben gezeigt, dass das Design der AIN/NCD-Mikrolinse, gemäß den Anforderungen an die verstimmbare Mikrolinse (siehe Kapitel 3.1, Anforderung 1), eine kontrollierte sphärische und asphärische Verformung der Membranoberfläche ermöglicht.

Beim Vergleich der simulierten elektromechanischen Wirkung der AIN/Si_xN_y- (siehe Tabelle 5.4) und der AIN/NCD-Mikrolinse lässt sich feststellen, dass die theoretisch zu erwartende Membranauslenkung der AIN/NCD-Linse um ca. 20 % größer ist, obwohl durch die isolierende NCD-Schicht nur ≈ 55 % der angelegten Spannung (20 V) auf die AIN-Schicht wirkt (≈ 11 V). Im Gegensatz dazu wird bei der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse die Spannung von 20 V direkt an die piezoelektrische AIN-Schicht angelegt. Der Grund für die größere Membranauslenkung ist die reduzierte Gesamtdicke der AIN/NCD-Membran und der hohe E-Modul von NCD, welcher das E-Modul-Verhältnis E_{NCD}/E_{AIN} der unimorphen Struktur deutlich erhöht und somit die Auslenkung der Membran optimiert (siehe Kapitel 3.3).

Tabelle 6.4: Simulierte Ergebnisse der maximalen Membranauslenkung h und der lateralen Verschiebung der Membranauslenkung x_D der AIN/NCD-Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm. x_a steht hierbei für die Auslenkung bei Anregung zweier gegenüberliegender Sektoren. Die vier Sektoren wurden dabei auf unterschiedliche Varianten angesteuert.

aktuierte Sektoren	angelegte Spannung in V	h in nm	x_D in μm
1 – 4	± 20	2600	0
4	± 20	600	6
1 und 2	± 20	1200	8
1 – 2, 3 – 4	+20, -20	$x_a = 115$	16

6.9 Elektromechanische Charakterisierung der AIN/NCD-Mikrolinse

Die AIN/NCD-Multisegment-Mikrolinsen wurden elektromechanisch mit der Weißlichtinterferometrie und dynamisch mit der Laser-Doppler-Vibrometrie charakterisiert um die Funktionalität der piezoelektrisch aktuierten AIN/NCD-Mikrolinsen zu demonstrieren. Hierfür wurden zu Beginn die spezifischen Widerstände der AIN/NCD-Heterostruktur der einzelnen Sektoren bestimmt. Diese lagen im Bereich zwischen $3 \times 10^4 \Omega\text{m}$ und $3 \times 10^5 \Omega\text{m}$ und sind somit deutlich geringer als die ermittelten spezifischen Widerstände der AIN/Si_xN_y-Mikrolinsen ($3 \times 10^7 \Omega\text{m}$ - $3 \times 10^{10} \Omega\text{m}$) und als die Literaturwerte von AIN-Dünnschichten ($10^9 \Omega\text{m}$ - $10^{11} \Omega\text{m}$) [230]. Gründe hierfür könnten eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit entlang der Kristallitgrenze sein oder Pinholes in der AIN-Schicht, welche während des Überwachsens mit Diamant in H₂-Atmosphäre bei bis zu 700°C entstehen können. Die

Pinholes können während des Herstellungsprozesses mit elektrisch leitendem Material (ITO) ausgefüllt werden und somit die Leitfähigkeit von AlN erhöhen.

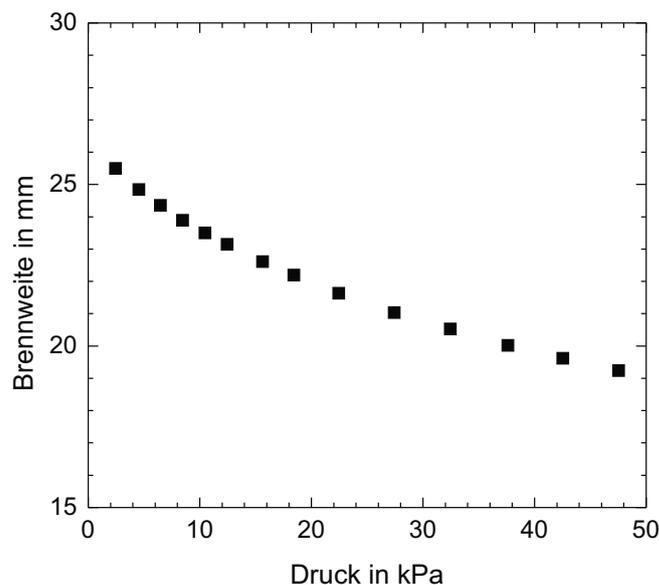


Abbildung 6.15: Änderung der Brennweite einer AlN/NCD-Mikrolinse mit $d_L = 2$ mm in Abhängigkeit vom angelegten Druck

Für die elektromechanische Charakterisierung der AlN/NCD-Mikrolinsen wurden die Chips, wie in Kapitel 5.7 beschrieben, in die Messhalterung integriert, die Kavität unterhalb der Membran mit Luft gefüllt und ein konstanter Differenzdruck von $\approx 10^5$ Pa erzeugt, welcher während der Messung konstant gehalten wurde. Zu Beginn wurde die Auslenkung einer AlN/NCD-Mikrolinse mit einem Durchmesser von 2 mm mittels WLI für unterschiedliche Arbeitsdrücke im Bereich von 0 kPa bis 50 kPa gemessen und die Brennweite der Mikrolinse für den jeweiligen Arbeitsdruck unter der Annahme, dass die Kavität unterhalb der Membran mit einem Immersionsöl mit $n = 1,517$ gefüllt ist, mit Gleichung 5.16 und Gleichung 5.17 ermittelt (Abbildung 6.15). Für eine AlN/NCD-Mikrolinse mit einem Durchmesser von 2 mm kann die Brennweite zwischen 19 mm und 25 mm eingestellt werden. Somit können Mikrolinsen mit numerischen Aperturen $NA \approx 0,1$ hergestellt werden.

Statische Vermessung der AlN/NCD-Mikrolinse

Die herausragenden mechanischen Eigenschaften von NCD ermöglichen die Herstellung von mechanisch-stabilen AlN/NCD-Mikrolinsen mit einem Durchmesser von bis zu 2 mm. Aus diesem Grund wurde die statische Vermessung der Viersektoren-AlN/NCD-Mikrolinsen mittels WLI exemplarisch an einer zugverspannten AlN/NCD-Mikrolinse mit einem Durchmesser von 2 mm durchgeführt. Durch die Zugspannung konnte, im Vergleich zur druckverspannten AlN/Si_xN_y-Mikrolinse, lediglich eine Membranauslenkung von ≈ 13 μm bei der Vorauswölbung der unimorphen Membran mit einem Differenzdruck von $\approx 10^5$ Pa erreicht werden. Nach der Vorauswölbung der AlN/NCD-Linsenmembran wurden einzelne oder alle Sektoren angeregt und die jeweilige Membranoberfläche mit dem WLI aufgezeichnet. Darüber hinaus wurden zwei Querschnittsprofile durch die Mitte von zwei gegenüberliegenden Sektoren aufgenommen. Das Profil 1 bezeichnet, wie bei der Charakterisierung der AlN/Si_xN_y-Mikrolinse, das Querschnittsprofil durch die Mitte der Sektoren 3 und 1 und das

Profil 2 das Querschnittsprofil durch die Mitte der Sektoren 2 und 4. Die Auslenkung der Membranlinse ist hierbei bei allen Diagrammen bei 0 V in schwarz, bei positiven Spannungen in rot und bei negativen Spannungen in blau dargestellt.

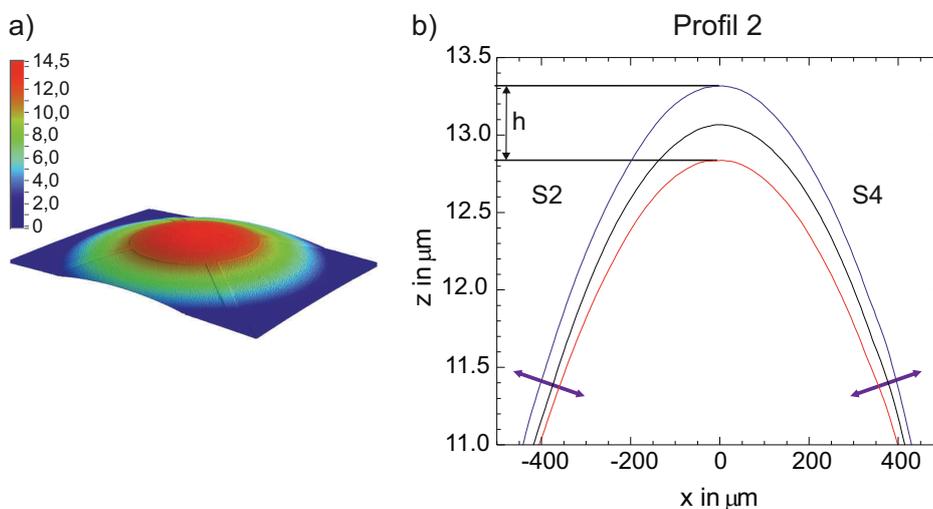


Abbildung 6.16: Darstellung a) der Oberflächentopographie der AIN/NCD-Linsenmembran und b) des Querschnittsprofils der AIN/NCD/B-NCD-Linsenmembran bei Aktuierung aller vier Sektoren mit 0 V, +15 V und -15 V

Zu Beginn wurden alle vier Sektoren gleichzeitig mit den gleichen Spannungen von 0 V, +15 V und -15 V aktuiert. Da sich zwischen der B-NCD-Elektrode und dem AIN Piezoaktor eine 150 nm dünne isolierende NCD-Schicht befindet, erreichen nur $\approx 55\%$ (8,3 V) der angelegten Spannung die AIN-Schicht. Eine höhere Spannung konnte aufgrund des geringen spezifischen Widerstandes einzelner Sektoren nicht angelegt werden. In Abbildung 6.16 ist die Oberflächentopographie und das Querschnittsprofil 2 bei Aktuierung der AIN/NCD-Linsenmembran mit 0 V, +15 V und -15 V dargestellt. Hierbei wird, wie bei der statischen Vermessung der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse, lediglich der mittlere Bereich der Linsenmembran mit $d_L = 1\ \mu\text{m}$ gezeigt. Bei Anregung aller vier Sektoren konnte eine maximale Auslenkung h zwischen positiver und negativer Spannung von 480 nm erreicht werden. Wird die Membran mit Immersionsöl mit $n = 1,5$ vorgewölbt, kann die Brennweite dieser Linse somit zwischen 75,8 mm und 73,0 mm variiert werden.

Zur Demonstration der asphärischen Verformung der Linsenoberfläche wurde im nächsten Schritt ausschließlich Sektor 3 mit 0V, +20 V und -20 V angeregt. In Abbildung 6.17 sind die entsprechenden Querschnittsprofile 1 und 2 aufgezeigt. Auf die Darstellung der Profile bei 0 V wird im Folgenden verzichtet. Das Profil 2 zeigt eine symmetrische Verschiebung der Linsenmembran. Im Gegensatz dazu ist im Querschnittsprofil 1 eine asymmetrische Verschiebung der Linsenmembran entlang des angeregten Sektors 3 zu erkennen mit einer maximalen Auslenkung h von 100 nm und einer lateralen Verschiebung x_D von 8 µm.

Zusätzlich wurden zwei benachbarte Sektoren 1 und 2 mit den gleichen Spannungen von +20 V und -20 V angeregt. Da sich beide Querschnittsprofile gleichen, ist in Abbildung 6.18a lediglich das Profil 2 dargestellt. Hierbei ist eindeutig eine asymmetrische Verschiebung der Linsenmembran entlang des Sektors 2 zu sehen. Die maximale Auslenkung h und die laterale Verschiebung x_D konnten zu 240 nm und 15 µm ermittelt werden.

Abschließend wurden zwei benachbarte Sektoren 1 und 2 mit +15 V und -15 V und die

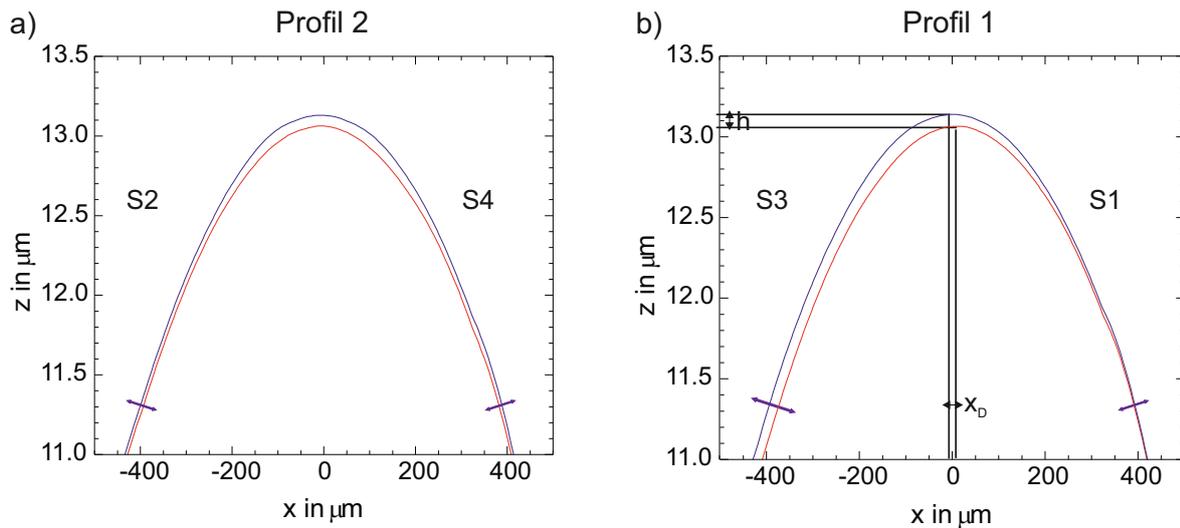


Abbildung 6.17: Querschnittsprofile der AIN/NCD-Linsenmembran bei Aktuierung des Sektors 3 mit +20 V und -20 V

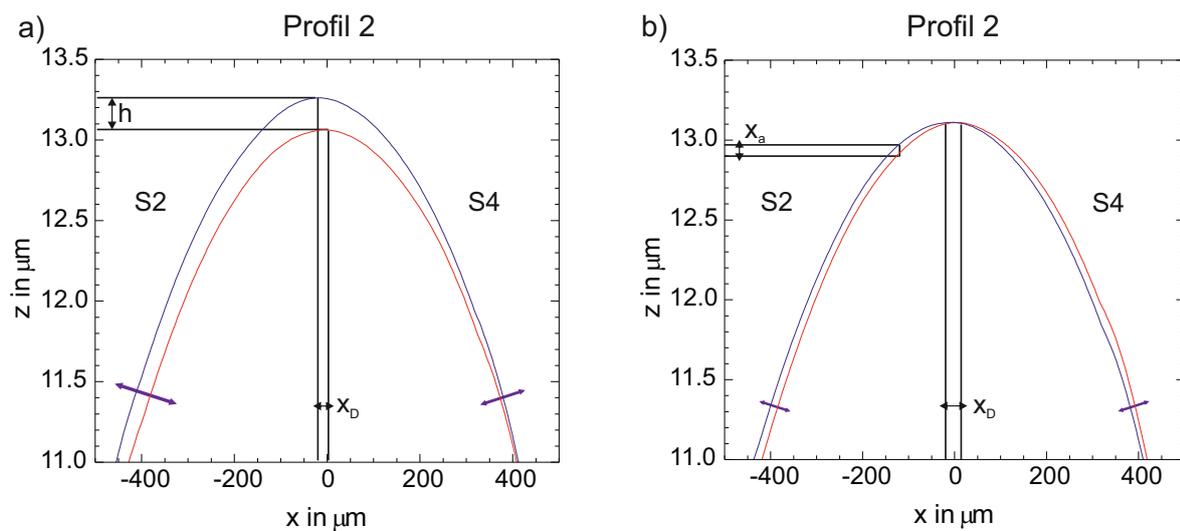


Abbildung 6.18: Querschnittsprofil der AIN/NCD-Linsenmembran a) bei Aktuierung des Sektors 1 und 2 mit +20 V und -20 V und b) bei gleichzeitiger Aktuierung des Sektors 1 und 2 mit +15 V und -15 V und Sektor 3 und 4 mit -15 V und +15 V

beiden gegenüberliegenden Sektoren 3 und 4 gleichzeitig mit -15 V und $+15\text{ V}$ angeregt (Abbildung 6.18b). Hierbei wird die Linsenmembran asymmetrisch verformt mit $x_D = 18\text{ }\mu\text{m}$ und $x_a = 100\text{ nm}$.

Die statische Vermessung der AIN/NCD-Linsenmembran hat die unabhängige Funktionsweise der Sektoren gezeigt. Dadurch ist die Anforderung an die Mikrolinse, eine kontrollierte sphärische und asphärische Verformung der Linsenoberfläche zu gewährleisten, erfüllt (siehe Kapitel 3.1, Anforderung 1).

Dynamische Vermessung der AIN/NCD-Mikrolinse

Die dynamische Vermessung der AIN/NCD-Mikrolinse mittels LDV wurde exemplarisch an einer zugverspannten AIN/NCD-Mikrolinse mit einem Durchmesser von $0,5\text{ mm}$ durchgeführt. Für eine detaillierte Beschreibung des Messaufbaus und der -durchführung sei auf Kapitel 5.7 verwiesen. Die AIN/NCD-Linsenmembran wurde zu Beginn mit Luft vorgewölbt und ein Messgitter auf das Kamerabild der Linse gelegt. Anschließend wurde an Sektor 1 ein sinusförmiges Signal mit einer Amplitude von 10 V bei einer Frequenz von 110 Hz außerhalb der Resonanzfrequenzen der Mikrolinse angelegt. Die resultierende asymmetrische Auslenkung der AIN/NCD-Linsenmembran ist in Abbildung 6.19a in 3D und in Abbildung 6.19b in 2D dargestellt.

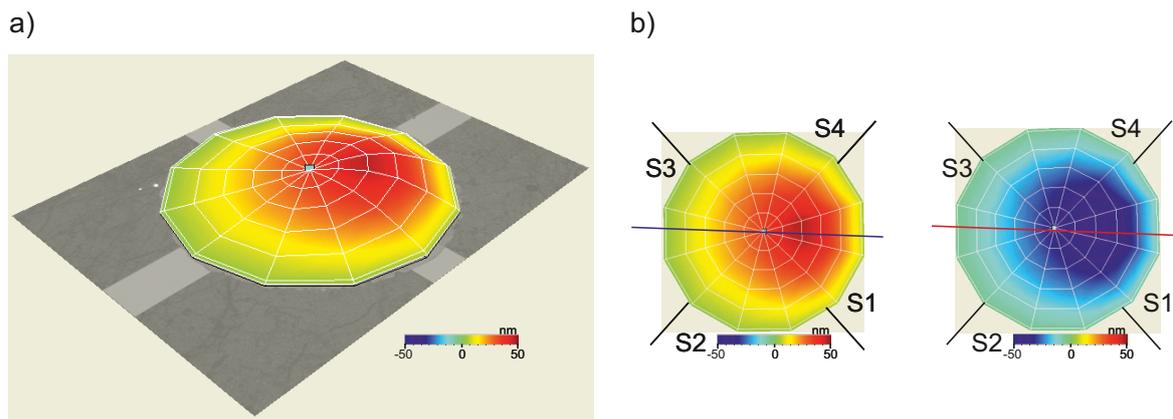


Abbildung 6.19: Maximale Auslenkung der asphärischen Verformung der AIN/NCD-Linsenmembran in a) 2D und b) 3D bei Aktuierung des Sektors 1 mit einer Wechselspannung von $+10\text{ V}$ und -10 V bei einer Frequenz von 110 Hz

Zusätzlich wurden zwei Querschnittsprofile durch die Mitte der Sektoren 1 und 3 (Profil 1) und durch die Mitte der Sektoren 2 und 4 (Profil 2) aufgenommen (Abbildung 6.20). Die beiden Profile unterscheiden sich hierbei deutlich voneinander. In Abbildung 6.20a (Profil 1) ist eindeutig eine asymmetrische Verformung der Linsenmembran entlang des angeregten Sektors zu erkennen. Die maximale Membranauslenkung h zwischen $+10\text{ V}$ und -10 V wurde für die AIN/NCD-Linsenmembran zu 100 nm ermittelt. Profil 2 zeigt hingegen eine symmetrische Auslenkung der Linsenmembran. Abschließend wurde die Anregungsfrequenz bis auf 50 kHz erhöht. Erst ab dieser Frequenz war eine Reduzierung der Membranauslenkung erkennbar. Die piezoelektrisch aktuierten AIN/NCD-Mikrolinsen ermöglichen somit, ebenso wie die AIN/Si_xN_y-Mikrolinsen, Reaktionszeiten bis in den μs -Bereich, welche jedoch bei der Verwendung mit Immersionsöl durch die Dämpfung reduziert werden kann. Die Reaktionszeiten sind dennoch deutlich kürzer als die Reaktionszeiten der

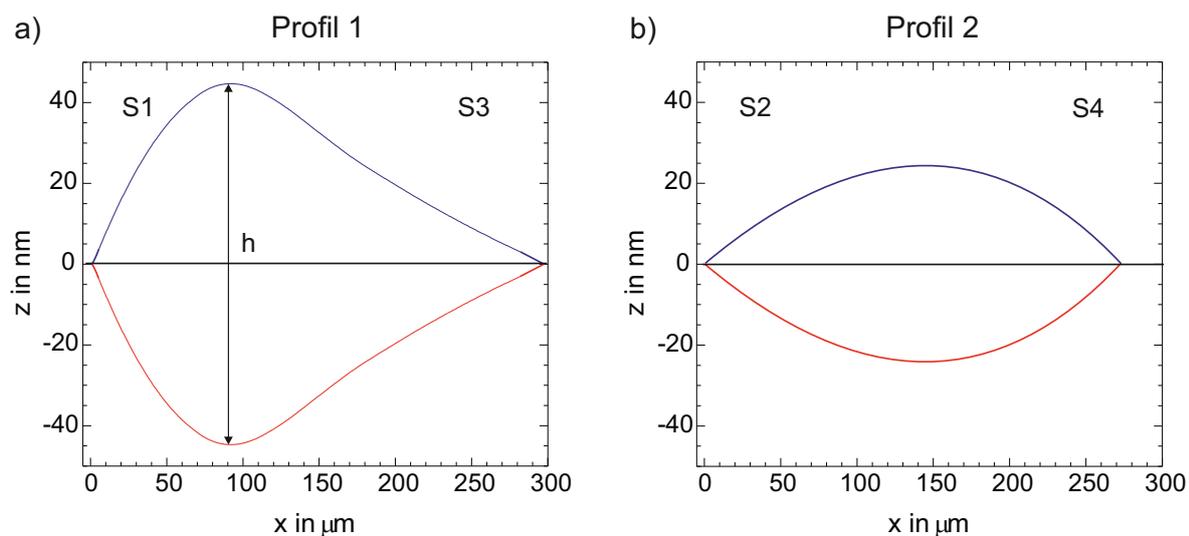


Abbildung 6.20: Querschnittsprofil der maximalen Auslenkung der AIN/NCD-Linsenmembran bei Aktuierung des Sektors 1 mit einer Wechsellspannung von $+10\text{ V}$ und -10 V bei einer Frequenz von 110 Hz gemessen mit Laser-Doppler-Vibrometrie

in der Literatur verwendeten alternativen Aktorprinzipien (siehe Kapitel 2). Dadurch ist, gemäß den Anforderungen an die verstimmbare Mikrolinse (siehe Kapitel 3.1, Anforderung 3), eine schnelle Verformung der Linsenoberfläche möglich.

Zusammenfassung

In Tabelle 6.5 sind die Ergebnisse der statischen und dynamischen Vermessung der AIN/NCD-Mikrolinsen mit einem Durchmesser von 2 mm (WLI) und $0,5\text{ mm}$ (LDV) sowie die simulierten Ergebnisse der maximalen Membranauslenkung h und der lateralen Verschiebung x_D einer AIN/NCD-Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm zusammengefasst.

Tabelle 6.5: Simulierte und reale Ergebnisse der maximalen Membranauslenkung h und der lateralen Verschiebung der Membranauslenkung x_D der AIN/NCD-Mikrolinsen mit einem Linsendurchmesser von $1,0\text{ mm}$ (Simulation), $2,0\text{ mm}$ (WLI) und $0,5\text{ mm}$ (LDV). Hierbei steht n. m. für nicht messbar.

aktuierte Sektoren	U in V	h in nm			x_D in μm		
		Simulation	WLI	LDV	Simulation	WLI	LDV
1 – 4	$\pm 20, \pm 15$ (WLI)	2600	480	-	0	0	-
4 oder 3	$\pm 20, \pm 10$ (LDV)	600	100	100	6	8	n. m.
1 und 2	± 20	1200	240	-	8	15	-
1 – 2, 3 – 4	$\pm 20, \pm 15$ (WLI)	$x_a = 115$	$x_a = 100$	-	16	18	-

Die realen Membranauslenkungen sind deutlich geringer (um ca. 80%) als die theoretisch zu erwartende Membranauslenkung. Ein direkter Vergleich der simulierten und realen

Ergebnisse ist jedoch nicht möglich, da die angelegten Spannungen nicht identisch und die Linsendurchmesser der simulierten und vermessenen AIN/NCD-Mikrolinsen unterschiedlich sind. Aufgrund der geringen spezifischen Widerstände der AIN/NCD-Mikrolinsen konnte die Spannung bei Anregung aller vier Sektoren nicht bis zu der in den Simulationen verwendeten Anregungsspannung von 20 V erhöht werden. Darüber hinaus wurde bei der Simulation nach Vorauswölbung der Linse eine Membranauslenkung von $\approx 20 \mu\text{m}$ angenommen, um die Simulation der elektromechanischen Wirkung der AIN/NCD- mit der AIN/Si_xN_y-Mikrolinse zu vergleichen. Die reale Membranauslenkung der Mikrolinse betrug allerdings $\approx 13 \mu\text{m}$. Des Weiteren könnte der reale d_{33} -Wert der AIN-Schicht, welche zur Herstellung der AIN/NCD-Mikrolinsen verwendet wurde, geringer sein als der für die Simulationen verwendete d_{33} -Wert von -5 pm/V .

6.10 Simulation der optischen Wirkung

Die optische Wirkung der AIN/NCD-Multisegment-Mikrolinse wurde im Rahmen dieser Arbeit mit dem Ray-Tracing-Programm ZEMAX an der Technischen Universität Ilmenau simuliert. ZEMAX bietet die Möglichkeit die Eigenschaften unterschiedlichster optischer Systeme zu berechnen. Um die optische Leistung der AIN/NCD-Mikrolinse zu simulieren, wurde die Bildqualität einer sphärischen Linse in Kombination mit der verstimmbaren AIN/NCD-Mikrolinse untersucht. In Abbildung 6.21a ist das simulierte optische System schematisch dargestellt. Das Licht wird hierbei an der Oberfläche der sphärischen Linse gebrochen und in einem Brennpunkt, der Bildebene, gesammelt.

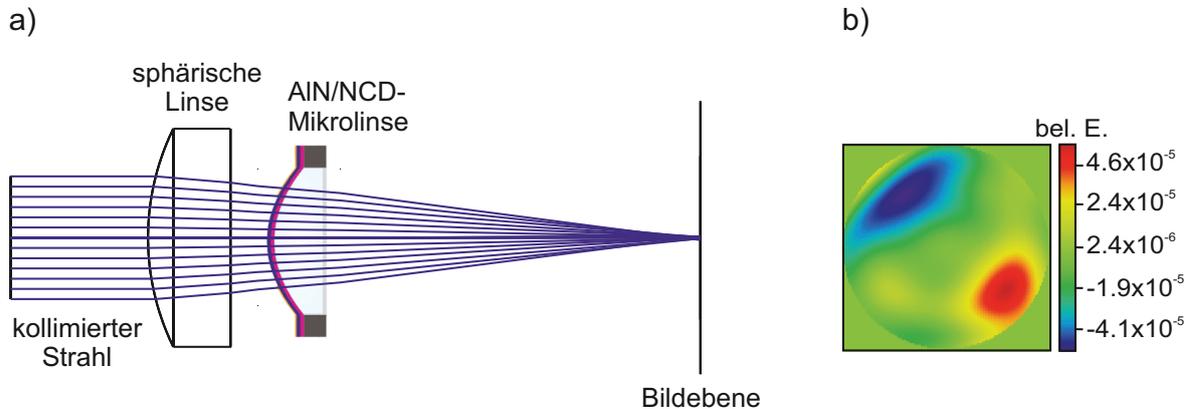


Abbildung 6.21: a) Schematische Darstellung des simulierten optischen Systems und b) optisches Modell der AIN/NCD-Mikrolinse

Die Abbildungsleistung dieses optischen Systems wird anschaulich mithilfe von Spotdiagrammen dargestellt. Das Spotdiagramm stellt dabei die Strahldurchstoßpunkte des jeweils zugehörigen Strahlbündels dar. In einem idealen System würden die Strahlen eines Bündels in der geometrisch-optischen Näherung in einem einzigen Bildpunkt zusammenlaufen. Aufgrund der Wellennatur des Lichtes ist jedoch eine Beugung unvermeidlich. Deshalb werden in den Spotdiagrammen zusätzlich Kreise eingezeichnet, welche den Airy-Durchmesser, den physikalisch kleinstmöglichen Spotdurchmesser, darstellen. Dieser bestimmt das Auflösungsvermögen des optischen Systems. Bei einer beugungsbegrenzten Abbildung befinden sich die Mehrzahl der Strahldurchstoßpunkte für einen Spot innerhalb

dieses Kreises. Treten Abbildungsfehler auf, entstehen charakteristische Zerstreungsfiguren. Das Auflösungsvermögen des optischen Systems wurde zusätzlich mithilfe der Modulations-Übertragungsfunktion (MTF, engl.: *modulation transfer function*) dargestellt. Die MTF beschreibt die Abschwächung des Ausgangssignals bei einer definierten Ortsfrequenz ν gegenüber dem Eingangssignal und ist definiert als [10]:

$$MTF(\nu) = \frac{M_{Bild}(\nu)}{M_{Original}(\nu)}. \quad (6.10)$$

Hierbei ist M_{Bild} die Bildmodulation (Bildkontrast) und $M_{Original}$ die Gegenstandsmodulation. Die Modulation (oder der Kontrast) ist gegeben durch [291]

$$M = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \quad (6.11)$$

Die MTF kann zwischen 0 und 1 (oder 0 % und 100 %) liegen, wobei 1 einer maximal möglichen Kontrastdarstellung entspricht und nur bei der Ortsfrequenz $\nu = 0$ erreicht wird. Mit zunehmender Ortsfrequenz wird diese durch Beugungseffekte reduziert bis bei 0 die Auflösungsgrenze der Optik, die maximal übertragbare Ortsfrequenz, erreicht ist. Die Ortsfrequenz wird üblicherweise in Linienpaare pro Millimeter (Lp/mm) angegeben. Für eine detaillierte Beschreibung der Modulations-Übertragungsfunktion sei auf [10] verwiesen.

Zur Charakterisierung der optischen Leistung der AIN/NCD-Mikrolinse wurde in ZEMAX ein optisches Modell der verstimmbaren Linse erstellt. Hierfür wurden die Ergebnisse der statischen Vermessung einer AIN/NCD-Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm mit dem WLI bei Anregung des Sektors 1 mit +10 V und des Sektors 3 mit -10 V in MATLAB über Zernike-Polynome als mathematische Fläche angegeben (Abbildung 6.21b) und anschließend in ZEMAX eingelesen.

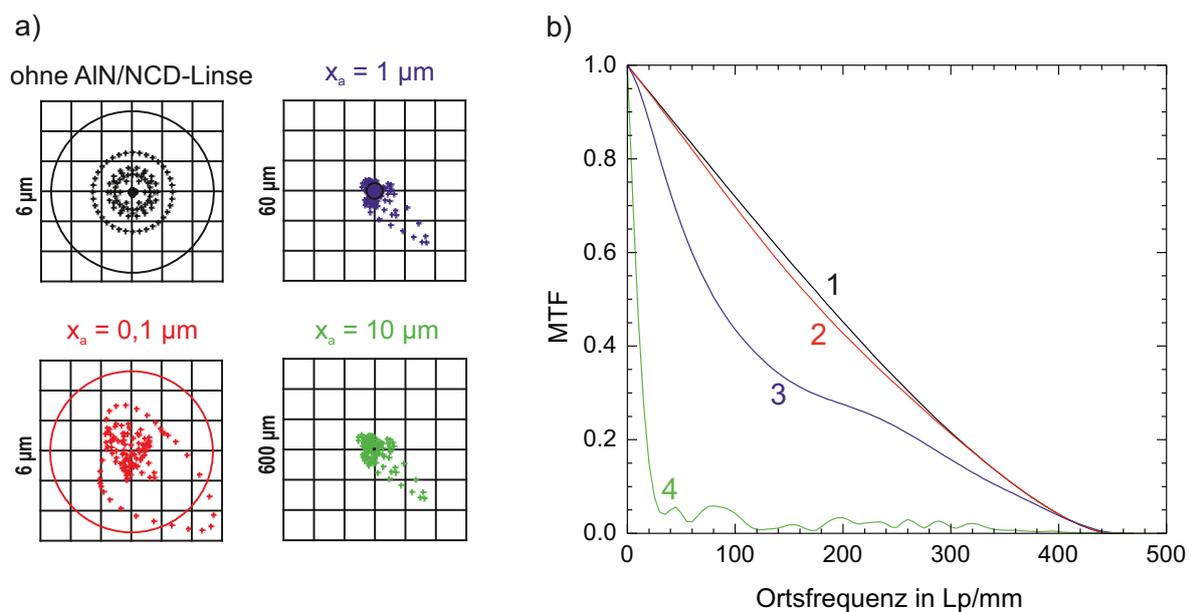


Abbildung 6.22: a) Spotdiagramme und b) MTF des optischen Systems ohne (1) und mit integrierter AIN/NCD-Mikrolinse mit einer Auslenkung x_a von $0,1 \mu\text{m}$ (2), $1 \mu\text{m}$ (3) und $10 \mu\text{m}$ (4)

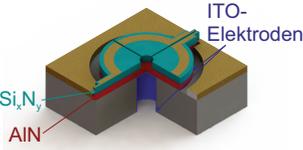
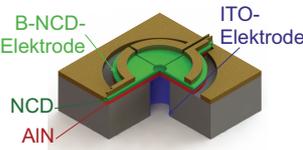
In Abbildung 6.22 sind die Spotdiagramme und Modulations-Übertragungsfunktionen des optischen Systems ohne und mit Aktuierung der AIN/NCD-Mikrolinse dargestellt. Zu Beginn wurde ausschließlich die Abbildungsleistung der sphärischen Linse ohne die verstimmbar Mikrolinse untersucht. Das Spotdiagramm und die MTF der sphärischen Linse sind in Abbildung 6.22a in schwarz dargestellt. Hierbei treten lediglich sphärische Aberrationen auf und die Abbildungsqualität ist nahezu beugungsbegrenzt. Anschließend wurde die Bildqualität der sphärischen Linse in Kombination mit der AIN/NCD-Mikrolinse untersucht. Dabei wurde die Auslenkung x_a bei Anregung zweier gegenüberliegender Sektoren variiert (0,1 μm (2), 1 μm (3) und 10 μm (4)). Wird die Mikrolinse mit 0,1 μm ausgelenkt, weicht die MTF von der idealen, beugungsbegrenzten Form ab. Mit der verstimmbar AIN/NCD-Mikrolinse mit einer Auslenkung von 0,1 μm sollte es somit möglich sein, kleine Abbildungsfehler zu korrigieren. Wird die Auslenkung der Mikrolinse bis auf 10 μm erhöht fallen die MTF-Werte mit steigender Ortsfrequenz deutlich schneller ab. Dadurch könnten piezoelektrisch aktuierte Mikrolinsen mit einer Auslenkung von $\geq 1 \mu\text{m}$ die Korrektur von Abbildungsfehlern optimieren.

In diesem Kapitel wurde die zweite Mikrolinsenvariante vorgestellt. Diese besteht aus einer piezoelektrischen AIN- und einer elastischen NCD-Schicht. Hierbei wurde zu Beginn gezeigt, dass Bor-dotierter nanokristalliner Diamant als transparente Elektrode für die Herstellung von verstimmbar Mikrolinsen verwendet werden kann. Nach der Beschreibung der elastischen und optischen Eigenschaften der Einzel und Heterostrukturen wurde die Herstellung der piezoelektrisch aktuierten AIN/NCD-Mikrolinse dargestellt. Anschließend wurde die Funktionalität der AIN/NCD-Mikrolinse mittels elektromechanischer Charakterisierung demonstriert und die optische Wirkung simuliert. Im nächsten Kapitel werden die AIN/NCD-Mikrolinsen mit den in Kapitel 5 vorgestellten AIN/Si_xN_y-Mikrolinsen verglichen und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile diskutiert.

7 Vergleich der verschiedenen Bauelemente

Im Rahmen dieser Arbeit wurden adaptive $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ - und AlN/NCD -Mikrolinsen hergestellt und charakterisiert. Ein Vergleich der wichtigsten Eigenschaften der beiden Bauelemente ist in Tabelle 7.1 aufgeführt.

Tabelle 7.1: Vergleich der verstimmbaren $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ - mit der AlN/NCD -Mikrolinse

	$\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$-Mikrolinse 	AlN/NCD-Mikrolinse 
sphärische Verformung der Linsenoberfläche	✓	✓
asphärische Verformung der Linsenoberfläche	✓	✓
integrierte Aktorik	✓	✓
kurze Reaktionszeiten ≤ 1 ms	✓	✓
Anregungsspannungen ≤ 20 V	✓	✓
Transparenz im sichtbaren Spektralbereich	✓	✓
mechanische Stabilität		✓
kompakte Bauweise	✓	✓
Herstellungskosten	✓	
Verfügbarkeit	✓	
(theoretische) Auslenkung der Mikrolinse		✓
CMOS-Kompatibilität	✓	
Langzeitstabilität	✓	✓
Dotierbarkeit der elastischen Schicht		✓
größerer Durchmesser der Mikrolinsen		✓

Beide Linsentypen erfüllen die in Kapitel 3.1 aufgeführten Anforderungen an die verstimmbare Mikrolinse. Die $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ - und die AlN/NCD -Mikrolinsen ermöglichen sowohl eine sphärische als auch eine asphärische Verformung der Linsenoberfläche. Darüber hinaus besitzen beide Linsentypen eine in die Membran integrierte Aktorik und ermöglichen somit eine kompakte Bauweise der Bauelemente. Durch die piezoelektrische Aktuierung beider Mikrolinsentypen sind Reaktionszeiten bis in den μs -Bereich möglich. Weitere Vorteile beider

Linsensysteme sind die Verwendung von niedrigen Anregungsspannungen von ≤ 20 V und die hohe Transparenz der unimorphen Membranen im sichtbaren Spektralbereich. Darüber hinaus wurde die Langzeitstabilität der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ - sowie der AlN/NCD -Membranen untersucht. Beide unimorphen Membranen sind langzeitstabil und weisen im Gegensatz zu den konventionellen PDMS-Membranlinsen kein Kriechverhalten auf.

Ein deutlicher Unterschied lässt sich jedoch in der mechanischen Stabilität der beiden unimorphen Membranen feststellen. Der kombinierte Elastizitätsmodul der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Heterostruktur wurde zu ≈ 170 GPa ermittelt, wohingegen der E-Modul der AlN/NCD -Heterostruktur zu ≈ 687 GPa bestimmt werden konnte. Die herausragenden mechanischen Eigenschaften der NCD-Schicht verstärken die mechanische Stabilität der unimorphen AlN/NCD -Membran. Aus diesem Grund eignet sich die Kombination aus piezoaktivem AlN und elastischem NCD besonders gut zur Herstellung von mechanisch-stabilen verstimmbaren Mikrolinsen mit reduzierter Schichtdicke und größerem Durchmesser ($d_L \geq 2$ mm). Die mechanische Stabilität der unimorphen $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Struktur reicht dennoch aus, um Membran-basierte Mikrolinsen mit einem Durchmesser bis zu 2 mm bei einer Gesamtdicke von $1,1 \mu\text{m}$ herzustellen. Des Weiteren bewirkt der hohe E-Modul der NCD-Schicht eine (theoretisch) größere Membranauslenkung der AlN/NCD -Mikrolinse (siehe Kapitel 6.8). Dadurch sollten eine optimierte Fokus- und Wellenfrontkorrektur möglich sein. Beim Vergleich der Messergebnisse der AlN/NCD -Mikrolinse mit einem Durchmesser von 2 mm (WLI) und 0,5 mm (LDV) (siehe Tabelle 6.5) und der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm (siehe Tabelle 5.5) lässt sich allerdings feststellen, dass bei der Aktuierung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Linsenmembran größere Membranauslenkungen realisiert werden konnten. Die geringen spezifischen Widerstände der AlN -Schichten der einzelnen Sektoren der AlN/NCD -Mikrolinse haben die maximale Anregungsspannung limitiert. Darüber hinaus sind die $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Membranen druckverspannt, wohingegen die charakterisierten unimorphen AlN/NCD -Membranen zugverspannt sind. Aus diesem Grund ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse untereinander nicht möglich.

Die entscheidenden Vorteile der piezoelektrisch aktuierten $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse sind die geringen Herstellungskosten, die hohe Verfügbarkeit der verwendeten Materialien und die CMOS-Kompatibilität.

Einen bedeutenden Vorteil der verstimmbaren AlN/NCD -Mikrolinse stellt die Möglichkeit dar, die NCD-Schicht mit Bor zu dotieren und somit die elektrischen Eigenschaften der NCD-Schicht einzustellen. Dadurch kann die elastische B-NCD-Schicht gleichzeitig als transparente Elektrode verwendet werden, wodurch die Anzahl der Dünnschichten und somit die Grenzflächen reduziert werden können. B-NCD-Schichten können synthetisch hergestellt werden und bieten eine gute Alternative zu den konventionellen Elektrodenmaterialien wie ITO.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Kombination aus AlN und NCD die Herstellung von mechanisch-stabileren verstimmbaren Mikrolinsen mit optimierter Linsenwirkung ermöglicht. $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Heterostrukturen eignen sich jedoch ebenfalls gut als kostengünstige Alternative zur Herstellung von Membran-basierten piezoelektrisch aktuierten Mikrolinsen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden verstimmbare Membran-basierte Mikrolinsen hergestellt und charakterisiert. Hierbei wurden neue Materialkombinationen aus Aluminiumnitrid (AlN) und Siliziumnitrid (Si_xN_y) bzw. aus AlN und nanokristallinem Diamant (NCD) für die adaptive Mikrooptik getestet und deren Vor- und Nachteile diskutiert. In Kapitel 2 wurde gezeigt, dass die meisten bisher bekannten verstimmbaren Mikrolinsen druckgesteuerte Membranlinsen sind, die ausschließlich eine kontrollierte Änderung der Brennweite ermöglichen. Diese besitzen externe Aktoren, um die Änderung des Druckes eines optischen Fluids zu realisieren. Die Kompaktheit der Bauelemente ist somit maßgeblich durch die Integration von aufwendigen Mechanismen zur Steuerung des Druckes beschränkt. Darüber hinaus haben die langen Reaktionszeiten und die teilweise hohen Versorgungsspannungen einen kommerziellen Erfolg der meisten Aktorprinzipien verhindert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges Konzept zur Verstimmung von Mikrolinsen entwickelt, welches sowohl eine kontrollierte sphärische als auch asphärische Verformung der Linsenoberfläche und somit erstmalig eine integrierte Fokus- und Wellenfrontkorrektur gewährleistet. Die Veränderung der Oberflächenkrümmung erfolgt hierbei durch einen in die Linsenmembran integrierten piezoelektrischen Aktor, welcher mit einer elastischen Schicht fest verbunden ist (unimorphes Prinzip). Zur Ansteuerung des Aktors wird die obere radiale Elektrode in vier unabhängige Segmente unterteilt, die getrennt voneinander angesteuert werden können und somit eine symmetrische und asymmetrische Verformung der Linsenoberfläche ermöglichen. Die in dieser Arbeit entwickelten piezoelektrisch aktuierten Mikrolinsen lassen sich in die Gruppe der flexiblen verstimmbaren Mikrolinsen einordnen (siehe Abbildung 2.1).

Zu Beginn dieser Arbeit wurden Mikrolinsen mit einem Durchmesser zwischen 0,5 mm und 2,0 mm aus einer piezoelektrischen AlN-Schicht und einer elastischen Si_xN_y -Schicht mit mikrotechnologischen Verfahren hergestellt. Indiumzinnoxid (ITO) wurde hierbei als untere und obere vergrabene, strukturierte Elektrode verwendet. Die unimorphen Dünnschichtmembranen zur Herstellung der verstimmbaren Mikrolinsen müssen eine Transparenz im sichtbaren Spektralbereich sowie eine hohe mechanische Stabilität und eine hohe piezoelektrische Leistungsfähigkeit aufweisen. Aus diesem Grund wurde die AlN/ Si_xN_y -Heterostruktur bezüglich ihrer elastischen, piezoelektrischen und optischen Eigenschaften charakterisiert. Die ermittelten Eigenschaften der Heterostrukturen sowie die Ergebnisse der mechanischen Simulation und der elektromechanischen Charakterisierung der AlN/ Si_xN_y -Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst. Die unimorphen AlN/ Si_xN_y -Membranen eignen sich gut zur Herstellung von mechanisch-stabilen verstimmbaren Mikrolinsen mit $d_L \leq 2$ mm. Anhand eines elektromechanischen Modells wurde die theoretisch mögliche Wirkungsweise der AlN/ Si_xN_y -Mikrolinsen simuliert und anschließend die Funktionalität der Linsen elektromechanisch mit der Weißlichtinterferome-

Tabelle 8.1: Zusammenfassung der ermittelten elastischen und piezoelektrischen Eigenschaften der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_{y-z}$ und der AlN/NCD -Heterostrukturen sowie die simulierten und realen Ergebnisse der maximalen Membranauslenkung h und der lateralen Verschiebung der Membranauslenkung x_D der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_{y-z}$ mit $d_L = 1 \text{ mm}$ und der AlN/NCD -Mikrolinse mit $d_L = 1 \text{ mm}$ (Simulation), $d_L = 2 \text{ mm}$ (WLI) bzw. $d_L = 0,5 \text{ mm}$ (LDV). Hierbei steht x_a für die Membranauslenkung bei Anregung zweier gegenüberliegender Sektoren und n. m. für nicht messbar.

Materialeigenschaft	$\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$			AlN/NCD		
	Simulation	WLI	LDV	Simulation	WLI	LDV
d in nm	1000			600		
E in GPa (Bulge-Test)	176 ± 2			687 ± 12		
d_{33} in pm/V	-3 – -5			-3 – -5		
Optische Transmission in %	60 – 80			60 – 90		
aktuierte Sektoren	h in nm					
	Simulation	WLI	LDV	Simulation	WLI	LDV
1 – 4 (sphärisch)	2100 ($\pm 20 \text{ V}$)	600 ($\pm 20 \text{ V}$)	-	2600 ($\pm 20 \text{ V}$)	480 ($\pm 15 \text{ V}$)	-
4 oder 3 (asphärisch)	500 ($\pm 20 \text{ V}$)	150 ($\pm 20 \text{ V}$)	250 ($\pm 10 \text{ V}$)	600 ($\pm 20 \text{ V}$)	100 ($\pm 20 \text{ V}$)	100 ($\pm 10 \text{ V}$)
1 und 2 (asphärisch)	1000 ($\pm 20 \text{ V}$)	290 ($\pm 20 \text{ V}$)	300 ($\pm 10 \text{ V}$)	1200 ($\pm 20 \text{ V}$)	240 ($\pm 20 \text{ V}$)	-
1 – 2, 3 – 4 (asphärisch)	$x_a = 110$	$x_a = 100$	-	$x_a = 115$	$x_a = 100$	-
aktuierte Sektoren	x_D in μm					
	Simulation	WLI	LDV	Simulation	WLI	LDV
1 – 4 (sphärisch)	0	0	-	0	0	-
4 oder 3 (asphärisch)	4 ($\pm 20 \text{ V}$)	6 ($\pm 20 \text{ V}$)	n. m.	6 ($\pm 20 \text{ V}$)	8 ($\pm 20 \text{ V}$)	n. m.
1 und 2 (asphärisch)	6 ($\pm 20 \text{ V}$)	10 ($\pm 20 \text{ V}$)	n. m.	8 ($\pm 20 \text{ V}$)	15 ($\pm 20 \text{ V}$)	-
1 – 2, 3 – 4 (asphärisch)	16 ($\pm 20 \text{ V}$)	22 ($\pm 20 \text{ V}$)	-	16 ($\pm 15 \text{ V}$)	18 ($\pm 15 \text{ V}$)	-

trie (WLI) und der Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) untersucht. Hierfür wurden einzelne oder alle Sektoren mit Spannungen ≤ 20 V angeregt und die resultierende Auslenkung der Linsenoberfläche gemessen. Dabei konnten Membranauslenkungen bis zu 600 nm und laterale Verschiebungen der Membranauslenkungen bis zu 22 μm demonstriert werden (siehe Tabelle 8.1). Beim Vergleich der realen Änderung der Membranoberfläche mit der simulierten Auslenkung konnte festgestellt werden, dass die theoretisch zu erwartende Auslenkungen für ideale Systeme deutlich größer sind als die tatsächlich gemessenen Membranauslenkungen. Die Gründe hierfür sind im Kapitel 5.7 beschrieben. Mit der elektromechanischen Charakterisierung der Membran-basierten $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse konnte erstmalig eine kontrollierte symmetrische und asymmetrische Verformung der Linsenoberfläche demonstriert werden. Mithilfe der dynamischen Vermessung der Mikrolinsen konnten Reaktionszeiten bis in den μs -Bereich ermittelt werden. Diese sind deutlich kürzer als die Reaktionszeiten der bisher gezeigten verstimmbaren Mikrolinsen und ermöglichen somit eine schnelle Durchstimmung der Mikrolinse. Die optische Leistungsfähigkeit der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen wurde mithilfe eines Shack-Hartmann-Sensors (SHS) untersucht. Dabei wurden einzelne oder alle Sektoren mit Spannungen ≤ 20 V angeregt und die resultierende Änderung einer Wellenfront detektiert. Die Messungen haben gezeigt, dass eine gezielte Manipulation der Wellenfront realisierbar ist. Somit sollte es möglich sein, mit dem neuartigen Design der verstimmbaren Mikrolinsen sowohl den Fokus als auch kleine Abbildungsfehler zu korrigieren.

Um die mechanische Stabilität der verstimmbaren Mikrolinsen zu erhöhen wurden im zweiten Teil der Arbeit piezoelektrisch aktivierte Mikrolinsen aus AlN und NCD hergestellt und charakterisiert. Die ermittelten Eigenschaften der Heterostrukturen sowie die Ergebnisse der mechanischen Simulation und der elektromechanischen Charakterisierung der AlN/NCD -Mikrolinse mit einem Durchmesser von 1 mm (Simulation), 2 mm (WLI) bzw. 0,5 mm (LDV) sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst. Aufgrund der hervorragenden elastischen Eigenschaften des Diamanten konnte die Gesamtdicke der unimorphen Struktur auf 600 nm reduziert werden und mechanisch-stabile Mikrolinsen mit einem Durchmesser von bis zu 2 mm realisiert werden. Durch die Dotierung mit Bor konnten die elektrischen Eigenschaften der Bor-dotierten NCD -Schichten (B- NCD) gezielt eingestellt werden. Mit Borkonzentrationen von $N_B \approx 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ konnten Leitfähigkeiten bis zu $\approx 100 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ erreicht werden. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass die unimorphen $\text{AlN}/\text{NCD}/\text{B-NCD}$ -Membranen eine hohe optische Transmission aufweisen. Dünne B- NCD -Schichten sind somit eine gute Alternative zu konventionellen transparenten Elektroden wie z. B. ITO . Aus diesem Grund wurden für die AlN/NCD -Mikrolinsen dünne B- NCD -Schichten als obere strukturierte Elektrode verwendet. Des Weiteren weisen die unimorphen AlN/NCD -Membranen eine sehr gute Elastizität und Flexibilität auf. Der kombinierte E-Modul ist deutlich größer als der E-Modul der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Heterostruktur. In diesen unimorphen AlN/NCD -Strukturen wird die Elastizität hauptsächlich durch die herausragenden Eigenschaften des Diamanten bestimmt. Die AlN/NCD -Mikrolinsen wurden statisch mit dem WLI und dynamisch mit dem LDV vermessen, um die Funktionalität der AlN/NCD -Mikrolinse zu demonstrieren. Bei Anregung einzelner oder aller Sektoren mit Spannungen ≤ 20 V konnten Membranauslenkungen bis zu 480 nm sowie laterale Verschiebungen der Membranauslenkungen bis zu 18 μm erreicht werden (Tabelle 8.1). Die in dieser Arbeit entwickelten AlN/NCD -Mikrolinsen erlauben ebenfalls eine sphärische und asphärische Verformung der Linsenoberfläche mit Reaktionszeiten bis in den μs -Bereich. Abschließend wurde ein elektromechanisches und optisches Modell der AlN/NCD -Mikrolinse erstellt um die theoretisch mögliche Linsenwirkung zu demonstrieren. Mit den Simulationen der mechanischen Wirkung

der AlN/NCD-Mikrolinse konnte festgestellt werden, dass die theoretisch zu erwartende Membranauslenkung deutlich höher ist, als die reale Membranauslenkung. Jedoch war ein direkter Vergleich der simulierten und realen Ergebnisse nicht möglich. Eine detaillierte Beschreibung kann dem Kapitel 6.9 entnommen werden. Die Simulation der optischen Wirkung mit ZEMAX hat gezeigt, dass es mit der AlN/NCD-Mikrolinse bei einer Auslenkung $\geq 0,1 \mu\text{m}$ möglich sein sollte kleine Abbildungsfehler zu korrigieren.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sowohl AlN/Si_xN_y- als auch AlN/NCD-Mikrolinsen eine kontrollierte symmetrische und asymmetrische Verformung der Linsenoberfläche ermöglichen und somit als Fokus- und Wellenfrontkorrektur in optischen Systemen eingesetzt werden können. Beide Mikrolinsenvarianten erfüllen die an die Mikrolinse gestellten Anforderungen (siehe Kapitel 3.1) und ermöglichen somit die Integration in ein mikrooptisches Gesamtsystem zur Abbildung von hochauflösenden Bildern (Abbildung 1.1). Verstimmbare Mikrolinsen, die neben der kontrollierten Änderung der Brennweite auch die Korrektur von Abbildungsfehlern ermöglichen sind bisher in der Literatur nicht bekannt. Das neuartige Konzept zur Verstimmung von Mikrolinsen und die neuen Materialkombinationen sind somit vielversprechend für verstimmbare, kompakte Mikrolinsen der nächsten Generation.

8.2 Ausblick

Ein interessanter Aspekt für zukünftige Arbeiten könnte die Untersuchung weiterer Materialkombinationen sein, die eine hohe piezoelektrische Leistungsfähigkeit und somit eine Erhöhung der Auslenkung der Linsenmembran ermöglichen. Hierfür könnte der nanokristalline Diamant mit Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) als alternatives piezoelektrisches Material kombiniert werden. Die Integration von PZT auf Diamantsubstraten stellt allerdings eine große Herausforderung dar [292]. Forschungsarbeiten auf dem Gebiet optischer Bauelemente basierend auf unimorphen PZT/Diamant-Strukturen sind bisher nicht bekannt.

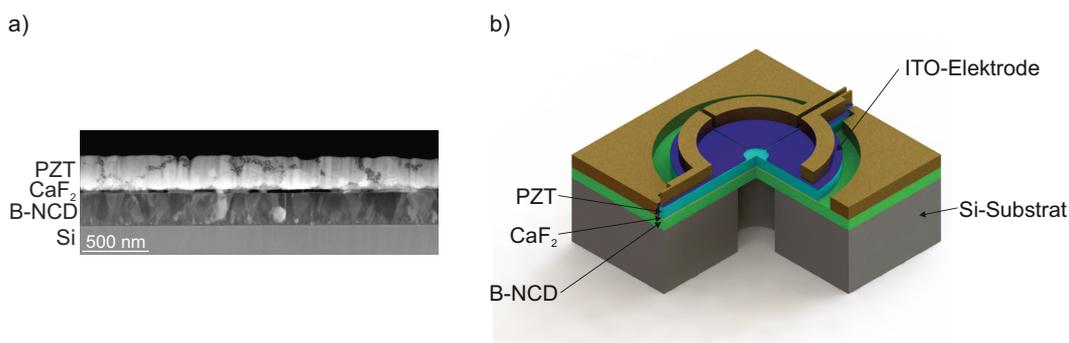


Abbildung 8.1: a) TEM-Aufnahme einer dünnen PZT-Schicht auf einem NCD/Si-Substrat und b) Schematischer Aufbau einer verstimmbaren unimorphen PZT/B-NCD-Mikrolinse. Die PZT-Schicht ist hierbei in hellblau, die B-NCD-Schicht in grün, die CaF₂-Zwischenschicht in gelb und die ITO-Elektrode in blau dargestellt.

Erste Versuche im Rahmen dieser Arbeit während eines Forschungsaufenthaltes am National Institute for Materials Science in Japan haben bereits gezeigt, dass dünne Bor-dotierte NCD-Schichten mit PZT unter Verwendung einer dünnen CaF₂-Zwischenschicht kombiniert werden können und sich aufgrund eines kombinierten E-Moduls von $\approx 300 \text{ GPa}$

zur Herstellung von Membran-basierten Mikrolinsen eignen. Eine TEM-Aufnahme der unimorphen B-NCD/PZT-Struktur und das mögliche Design der PZT/NCD-Mikrolinse ist in Abbildung 8.1 dargestellt. Dünne PZT-Schichten weisen einen herausragenden piezoelektrischen d_{33} -Koeffizienten von 200 - 300 pm/V gegenüber AlN auf und besitzen somit eine deutlich höhere piezoelektrische Leistungsfähigkeit. Simulationen der mechanischen Wirkung haben bereits gezeigt, dass die Auslenkung der Linsenmembran um 80 % gegenüber der Auslenkung der AlN/NCD-Mikrolinse erhöht werden kann [293].

Des Weiteren kann eine Erhöhung der Anzahl der Sektoren sowie eine radiale Anordnung die optische Leistungsfähigkeit der Linse und somit die Korrektur von Abbildungsfehlern optimieren.

Darüber hinaus kann die verstimmbare Mikrolinse wie in der Einleitung beschrieben (Abbildung 1.1) mit weiteren verstimmbaren Komponenten zu einem mikrooptischen Einapertur-Auge integriert werden. Dieses variable, ultrakompakte aktive mikrooptische System könnte zukünftig neue Möglichkeiten in der Kameratechnik, der Qualitätssicherung, der Prozesskontrolle, der Endoskopie, im Robotersehen sowie im maschinellen Sehen eröffnen.

Literaturverzeichnis

- [1] O. Skorka. Toward a digital camera to rival the human eye. *Journal of Electronic Imaging*, 20 (3), 033009, 2011. doi:10.1117/1.3611015.
- [2] Statista. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/251928/umfrage/besitz-eines-smartphones-handys-mit-foto-video-funktion-in-deutschland/>, 2015.
- [3] Statista. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/290051/umfrage/umfrage-in-deutschland-zur-nutzung-der-foto-video-funktion-von-handys/>, 2015.
- [4] M. Schäfer. Durchblick fürs Handy. Bericht, Badische Zeitung, 2013.
- [5] D. Pätz, S. Sinzinger, S. Leopold, M. Hoffmann, V. Zuerbig, O. Ambacher, V. Lebedev, T. Deutschmann, E. Oesterschulze. Adaptive scanning micro-eye. In H. Zappe, C. Duppé, Editoren, *Tunable Micro-optics*, Kapitel 15, Seiten 369–394. Cambridge University Press CUP, Cambridge, 2015.
- [6] S. Leopold, T. Polster, D. Paetz, F. Knoebber, O. Ambacher, S. Sinzinger, M. Hoffmann. MOEMS tunable microlens made of aluminum nitride membranes. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 12 (2), 023012, 2013. doi:10.1117/1.JMM.12.2.023012.
- [7] T. Deutschmann, E. Oesterschulze. Micro-structured electrochromic device based on poly(3,4-ethylenedioxythiophene). *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 23 (6), 065032, 2013. doi:10.1088/0960-1317/23/6/065032.
- [8] T. Deutschmann, E. Oesterschulze. Integrated electrochromic iris device for low power and space-limited applications. *Journal of Optics*, 16 (7), 075301, 2014. doi:10.1088/2040-8978/16/7/075301.
- [9] D. Paetz, T. Deutschmann, E. Oesterschulze, S. Sinzinger. Depth of focus analysis of optical systems using tunable aperture stops with a moderate level of absorption. *Applied optics*, 53 (28), 6508, 2014. doi:10.1364/AO.53.006508.
- [10] E. Hecht. *Optik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 5. Edition, 2009.
- [11] C. Germano. Flexure mode piezoelectric transducers. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 19 (1), 6–12, 1971. doi:10.1109/TAU.1971.1162159.
- [12] R. Voelkel. Micro-Optics: From High-End to Mass-Market. *Optik & Photonik*, 4 (4), 36–40, 2009. doi:10.1002/opph.201190060.
- [13] K. Iga, Y. Kokubun, M. Oikawa. *Fundamentals of microoptics*. Academic Press, New York, 1984.
- [14] H. Zappe. *Fundamentals of Micro-optics Technology , Devices and Applications*. Cambridge University Press, Cambridge, 2010.

- [15] S. Sinzinger, J. Jahns. *Microoptics*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003.
- [16] M. E. Motamedi. Merging micro-optics with micromechanics: micro-opto-electro-mechanical devices. In S. H. Lee, Editor, *Diffraction and Miniaturized Optics*. SPIE Proceedings Vol. CR49, 1993.
- [17] X. Zeng, H. Jiang. Liquid Tunable Microlenses based on MEMS techniques. *Journal of physics D: Applied physics*, 46 (32), 323001, 2013. doi:10.1088/0022-3727/46/32/323001.
- [18] J.-K. Lee, K.-W. Park, G. Lim, H.-R. Kim, S.-H. Kong. Variable-focus Liquid Lens Based on a Laterally-integrated Thermopneumatic Actuator. *Journal of the Optical Society of Korea*, 16 (1), 22–28, 2012. doi:10.3807/JOSK.2012.16.1.022.
- [19] S. Sato. Liquid-Crystal Lens-Cells with Variable Focal Length. *Japanese Journal of Applied Physics*, 18 (9), 1679–1684, 1979. doi:10.1143/JJAP.18.1679.
- [20] Y. Choi, J.-H. Park, J.-H. Kim, S.-D. Lee. Fabrication of a focal length variable microlens array based on a nematic liquid crystal. *Optical Materials*, 21 (1-3), 643–646, 2003. doi:10.1016/S0925-3467(02)00215-X.
- [21] H.-C. Lin, M.-S. Chen, Y.-H. Lin. A Review of Electrically Tunable Focusing Liquid Crystal Lenses. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 12 (6), 234–240, 2011. doi:10.4313/TEEM.2011.12.6.234.
- [22] H.-C. Lin, Y.-H. Lin. An electrically tunable-focusing liquid crystal lens with a low voltage and simple electrodes. *Optics E*, 20 (3), 2045–2052, 2012. doi:10.1364/OE.20.002045.
- [23] Y. Li, S.-T. Wu. Polarization independent adaptive microlens with a blue-phase liquid crystal. *Optics Express*, 19 (9), 8045–8050, 2011. doi:10.1364/OE.19.008045.
- [24] A. F. Naumov, M. Y. Loktev, I. R. Guralnik, G. Vdovin. Liquid-crystal adaptive lenses with modal control. *Optics Letters*, 23 (13), 992, 1998. doi:10.1364/OL.23.000992.
- [25] T. Nose, S. Sato. A liquid crystal microlens obtained with a non-uniform electric field. *Liquid Crystals*, 5 (5), 1425–1433, 1989. doi:10.1080/02678298908027780.
- [26] S. T. Kowel, P. Kornreich, A. Nouhi. Adaptive spherical lens. *Applied Optics*, 23 (16), 2774, 1984. doi:10.1364/AO.23.002774.
- [27] Y.-H. Lin, H.-S. Chen, M.-S. Chen. Electrically-tunable liquid crystal lenses and applications. In L.-C. Chien, D. J. Broer, V. Chigrinov, T.-H. Yoon, Editoren, *Proc. of SPIE*, volume 8642, Seite 86420C, 2013. doi:10.1117/12.2005580.
- [28] H. Ren, Y.-H. Fan, S. Gauza, S.-T. Wu. Tunable-focus flat liquid crystal spherical lens. *Applied Physics Letters*, 84 (23), 4789, 2004. doi:10.1063/1.1760226.
- [29] S. T. Kowel, D. S. Cleverly, P. G. Kornreich. Focusing by electrical modulation of refraction in a liquid crystal cell. *Applied Optics*, 23 (2), 278, 1984. doi:10.1364/AO.23.000278.

- [30] W. Zhang. *Thermo-pneumatic micro-lenses*. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2013.
- [31] G. Lippmann. Relations entre les phénomènes électriques et capillaires. *Annales de Chimie et de Physique*, 5, 494–549, 1875.
- [32] B. Berge. Électrocapillarité et mouillage de films isolants par l'eau. *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 316 (2), 157–163, 1993.
- [33] C. B. Gorman, H. A. Biebuyck, G. M. Whitesides. Control of the Shape of Liquid Lenses on a Modified Gold Surface Using an Applied Electrical Potential across a Self-Assembled Monolayer. *Langmuir*, 11 (6), 2242–2246, 1995. doi:10.1021/1a00006a063.
- [34] F. Krogmann, W. Moench, H. Zappe. Electrowetting for Tunable Microoptics. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 17 (6), 1501–1512, 2008. doi:10.1109/JMEMS.2008.2007256.
- [35] J. Jahns, S. Helfert. *Introduction to Micro- and Nanooptics*. WILEY-VCH, 2012.
- [36] B. Berge, J. Peseux. Variable focal lens controlled by an external voltage: An application of electrowetting. *The European Physical Journal E*, 3 (2), 159–163, 2000. doi:10.1007/s101890070029.
- [37] C. Li, H. Jiang. Electrowetting-driven variable-focus microlens on flexible surfaces. *Applied physics letters*, 100 (23), 231105–2311054, 2012. doi:10.1063/1.4726038.
- [38] C. Friese, A. Werber, F. Krogmann, W. Moench, H. Zappe. Materials, effects and components for tunable micro-optics. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2 (3), 232–248, 2007. doi:10.1002/tee.20138.
- [39] S. Kuiper, B. H. W. Hendriks. Variable-focus liquid lens for miniature cameras. *Applied Physics Letters*, 85 (7), 1128, 2004. doi:10.1063/1.1779954.
- [40] E. Simon, B. Berge, F. Fillit, H. Gatton, M. Guillet, O. Jacques-Sermet, F. Laune, J. Legrand, M. Maillard, N. Tallaron. Optical design rules of a camera module with a liquid lens and principle of command for AF and OIS functions. In Y. Wang, J. Bentley, C. Du, K. Tatsuno, H. P. Urbach, Editoren, *Optical Design and Testing IV*, Seite 784903, 2010. doi:10.1117/12.871634.
- [41] J. Zeng, T. Korsmeyer. Principles of droplet electrohydrodynamics for lab-on-a-chip. *Lab on a chip*, 4 (4), 265–77, 2004. doi:10.1039/b403082f.
- [42] P. R. C. Gascoyne, J. V. Vykoukal, J. A. Schwartz, T. J. Anderson, D. M. Vykoukal, K. W. Current, C. McConaghy, F. F. Becker, C. Andrews. Dielectrophoresis-based programmable fluidic processors. *Lab on a chip*, 4 (4), 299–309, 2004. doi:10.1039/b404130e.
- [43] C.-C. Cheng, J. A. Yeh. Dielectrically actuated liquid lens. *Optics Express*, 15 (12), 7140–5, 2007.

- [44] H. Ren, S.-T. Wu. Tunable-focus liquid microlens array using dielectrophoretic effect. *Optics express*, 16 (4), 2646–52, 2008.
- [45] T. Krupenkin, S. Yang, P. Mach. Tunable liquid microlens. *Applied Physics Letters*, 82 (3), 316, 2003. doi:10.1063/1.1536033.
- [46] Y. C. Seow, a. Q. Liu, L. K. Chin, X. C. Li, H. J. Huang, T. H. Cheng, X. Q. Zhou. Different curvatures of tunable liquid microlens via the control of laminar flow rate. *Applied Physics Letters*, 93 (8), 084101, 2008. doi:10.1063/1.2976210.
- [47] X. Mao, J. R. Waldeisen, B. K. Juluri, T. J. Huang. Hydrodynamically tunable optofluidic cylindrical microlens. *Lab on a chip*, 7 (10), 1303–8, 2007. doi:10.1039/b708863a.
- [48] S. K. Y. Tang, C. a. Stan, G. M. Whitesides. Dynamically reconfigurable liquid-core liquid-cladding lens in a microfluidic channel. *Lab on a chip*, 8 (3), 395–401, 2008. doi:10.1039/b717037h.
- [49] A. Werber, H. Zappe. Tunable Pneumatic Microoptics. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 17 (5), 1218–1227, 2008. doi:10.1109/JMEMS.2008.928712.
- [50] D.-Y. Zhang, V. Lien, Y. Berdichevsky, J. Choi, Y.-H. Lo. Fluidic adaptive lens with high focal length tunability. *Applied Physics Letters*, 82 (19), 3171, 2003. doi:10.1063/1.1573337.
- [51] D.-Y. Zhang, N. Justis, Y.-H. Lo. Fluidic adaptive lens of transformable lens type. *Applied Physics Letters*, 84 (21), 4194, 2004. doi:10.1063/1.1756679.
- [52] M. Agarwal, R. A. Gunasekaran, P. Coane, K. Varahramyan. Polymer-based variable focal length microlens system. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14 (12), 1665–1673, 2004. doi:10.1088/0960-1317/14/12/010.
- [53] Y.-K. Fuh, M.-X. Lin, S. Lee. Characterizing aberration of a pressure-actuated tunable biconvex microlens with a simple spherically-corrected design. *Optics and Lasers in Engineering*, 50 (12), 1677–1682, 2012. doi:10.1016/j.optlaseng.2012.07.013.
- [54] N. Chronis, G. Liu, K.-H. Jeong, L. Lee. Tunable liquid-filled microlens array integrated with microfluidic network. *Optics express*, 11 (19), 2370–8, 2003.
- [55] P. M. Moran, S. Dharmatilleke, A. H. Khaw, K. W. Tan, M. L. Chan, I. Rodriguez. Fluidic lenses with variable focal length. *Applied Physics Letters*, 88 (4), 041120, 2006. doi:10.1063/1.2168245.
- [56] H. B. Yu, G. Y. Zhou, F. S. Chau, F. W. Lee, S. H. Wang, H. M. Leung. A liquid-filled tunable double-focus microlens. *Optics Express*, 17 (6), 4782, 2009. doi:10.1364/OE.17.004782.
- [57] K. Aljaseem, A. Werber, A. Seifert, H. Zappe. Fiber optic tunable probe for endoscopic optical coherence tomography. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 10 (4), 044012, 2008. doi:10.1088/1464-4258/10/4/044012.

- [58] S. W. Lee, S. S. Lee. Focal tunable liquid lens integrated with an electromagnetic actuator. *Applied Physics Letters*, 90 (12), 121129, 2007. doi:10.1063/1.2716213.
- [59] J. K. Lee, K.-W. Park, J. C. Choi, H.-R. Kim, S. H. Kong. Design and fabrication of PMMA-micromachined fluid lens based on electromagnetic actuation on PMMA-PDMS bonded membrane. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 22 (11), 115028, 2012. doi:10.1088/0960-1317/22/11/115028.
- [60] J. Lee, K.-W. Park, J. Choi, H.-R. Kim, S. Kong. Variable-Focus Fluid Lens Using an Electromagnetic Actuator. *Acta Physica Polonica A*, 123 (2), 202–204, 2013. doi:10.12693/APhysPolA.123.202.
- [61] H. Yu, G. Zhou, F. S. Chau, S. K. Sinha. Tunable electromagnetically actuated liquid-filled lens. *Sensors and Actuators A: Physical*, 167 (2), 602–607, 2011. doi:10.1016/j.sna.2011.03.005.
- [62] H.-C. Cheng, S. Xu, Y. Liu, S. Levi, S.-T. Wu. Adaptive mechanical-wetting lens actuated by ferrofluids. *Optics Communications*, 284 (8), 2118–2121, 2011. doi:10.1016/j.optcom.2010.12.073.
- [63] D. Hoheisel, L. Rissing. Thin film fabrication and system integration test run for a microactuator for a tuneable lens. In M. A. Maher, P. J. Resnick, Editoren, *Proc. of SPIE*, volume 8973, Seite 897305, 2014. doi:10.1117/12.2039061.
- [64] M. Giovanni. *Flat and Corrugated Diaphragm Design Handbook*. Marcel Dekker Inc., New York, 1982.
- [65] W. Zhang, K. Aljasem, H. Zappe, A. Seifert. Completely integrated, thermo-pneumatically tunable microlens. *Optics express*, 19 (3), 2347–62, 2011.
- [66] W. Wang, J. Fang, K. Varahramyan. Compact variable-focusing microlens with integrated thermal actuator and sensor. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17 (12), 2643–2645, 2005. doi:10.1109/LPT.2005.859129.
- [67] W. Wang, J. Fang. Design, fabrication and testing of a micromachined integrated tunable microlens. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16 (7), 1221–1226, 2006. doi:10.1088/0960-1317/16/7/015.
- [68] X. Huang, J. Ni, S. Yan, P. R. LeDuc, J. Yao, Q. Lin. Thermally Tunable Polymer Microlenses for Biological Imaging. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 19 (6), 1444–1449, 2010. doi:10.1109/JMEMS.2010.2082499.
- [69] S.-Y. Lee, H.-W. Tung, W.-C. Chen, W. Fang. Thermal Actuated Solid Tunable Lens. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18 (21), 2191–2193, 2006. doi:10.1109/LPT.2006.883891.
- [70] G. Beadie, M. L. Sandrock, M. J. Wiggins, R. S. Lepkowicz, J. S. Shirk, M. Ponting, Y. Yang, T. Kazmierczak, A. Hiltner, E. Baer. Tunable polymer lens. *Optics Express*, 16 (16), 11847, 2008. doi:10.1364/OE.16.011847.

- [71] T. Polster. *Aluminiumnitrid Dünnschichtmembranen: Charakterisierung und technologische Integration in den MEMS-Prozessfluss*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2014.
- [72] S. Leopold. unveröffentlichtes Ergebnis entstanden im Rahmen des DFG-Projektes AdaScan.
- [73] S. Leopold, D. Paetz, F. Knoebber, T. Polster, O. Ambacher, S. Sinzinger, M. Hoffmann. Tunable refractive beam steering using aluminum nitride thermal actuators. In S. S. Olivier, T. G. Bifano, J. A. Kubby, Editoren, *SPIE Photonics West 2011*, volume 7931, Seiten 79310B–79310B–7, 2011. doi:10.1117/12.874826.
- [74] Y. Qiu, K. Park. Environment-sensitive hydrogels for drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 53 (3), 321–339, 2001. doi:10.1016/S0169-409X(01)00203-4.
- [75] L. Dong, A. K. Agarwal, D. J. Beebe, H. Jiang. Adaptive liquid microlenses activated by stimuli-responsive hydrogels. *Nature*, 442 (7102), 551–4, 2006. doi:10.1038/nature05024.
- [76] L. Dong, A. K. Agarwal, D. J. Beebe, H. Jiang. Variable-Focus Liquid Microlenses and Microlens Arrays Actuated by Thermo-responsive Hydrogels. *Advanced Materials*, 19 (3), 401–405, 2007. doi:10.1002/adma.200601561.
- [77] L. Dong, H. Jiang. pH-adaptive microlenses using pinned liquid-liquid interfaces actuated by pH-responsive hydrogel. *Applied Physics Letters*, 89 (21), 211120, 2006. doi:10.1063/1.2393038.
- [78] X. Zeng, H. Jiang. Tunable liquid microlens actuated by infrared light-responsive hydrogel. *Applied Physics Letters*, 93 (15), 151101, 2008. doi:10.1063/1.2996271.
- [79] X. Zeng, C. T. Smith, J. C. Gould, C. P. Heise, H. Jiang. Fiber Endoscopes Utilizing Liquid Tunable-Focus Microlenses Actuated Through Infrared Light. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 20 (3), 583–593, 2011. doi:10.1109/JMEMS.2011.2127456.
- [80] D. Zhu, C.-W. Lo, C. Li, H. Jiang. Hydrogel-Based Tunable-Focus Liquid Microlens Array With Fast Response Time. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 21 (5), 1146–1155, 2012. doi:10.1109/JMEMS.2012.2196492.
- [81] J. Wang, Z. Chen, M. Mauk, K.-S. Hong, M. Li, S. Yang, H. H. Bau. Self-actuated, thermo-responsive hydrogel valves for lab on a chip. *Biomedical microdevices*, 7 (4), 313–22, 2005. doi:10.1007/s10544-005-6073-z.
- [82] R. Maeda, J. Tsaor, S. Lee, M. Ichiki. Piezoelectric Microactuator Devices. *Journal of Electroceramics*, 12 (1/2), 89–100, 2004. doi:10.1023/B:JECR.0000034003.47433.7e.
- [83] H. Oku, K. Hashimoto, M. Ishikawa. Variable-focus lens with 1-kHz bandwidth. *Optics Express*, 12 (10), 2138, 2004. doi:10.1364/OPEX.12.002138.

- [84] H. Oku, M. Ishikawa. High-speed liquid lens with 2 ms response and 80.3 nm root-mean-square wavefront error. *Applied Physics Letters*, 94 (22), 221108, 2009. doi:10.1063/1.3143624.
- [85] F. Schneider, J. Draheim, C. Müller, U. Wallrabe. Optimization of an adaptive PDMS-membrane lens with an integrated actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 154 (2), 316–321, 2009. doi:10.1016/j.sna.2008.07.006.
- [86] T. Kaneko, K. Ohba, N. Mitsumoto, N. Kawahara. Quick Response Dynamic Focusing Lens using Multi-Layered Piezoelectric Bimorph Actuator. In R. R. A. Syms, Editor, *Proc. of SPIE*, volume 4075, Seiten 24–31, 2000. doi:10.1117/12.397918.
- [87] A. Michael, C. Kwok. Piezoelectrically driven micro-lens out-of-plane actuation. *Procedia Engineering*, 25, 697–700, 2011. doi:10.1016/j.proeng.2011.12.172.
- [88] N. Binh-Khiem, K. Matsumoto, I. Shimoyama. Polymer thin film deposited on liquid for varifocal encapsulated liquid lenses. *Applied Physics Letters*, 93 (12), 124101, 2008. doi:10.1063/1.2988467.
- [89] A. Pouydebasque, C. Bridoux, F. Jacquet, S. Moreau, E. Sage, D. Saint-Patrice, C. Bouvier, C. Kopp, G. Marchand, S. Bolis, N. Sillon, E. Vigier-Blanc. Varifocal liquid lenses with integrated actuator, high focusing power and low operating voltage fabricated on 200mm wafers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 172 (1), 280–286, 2011. doi:10.1016/j.sna.2011.05.005.
- [90] V. Reboud, I. Obieta, L. Bilbao, V. Saez-Martinez, M. Brun, F. Laulagnet, S. Landis. Imprinted hydrogels for tunable hemispherical microlenses. *Microelectronic Engineering*, 111, 189–192, 2013. doi:10.1016/j.mee.2013.03.150.
- [91] S.-H. Ahn, Y.-K. Kim. Proposal of human eye's crystalline lens-like variable focusing lens. *Sensors and Actuators A: Physical*, 78 (1), 48–53, 1999. doi:10.1016/S0924-4247(99)00203-4.
- [92] S. Leopold, D. Paetz, F. Knoebber, O. Ambacher, S. Sinzinger, M. Hoffmann. Tunable cylindrical microlenses based on aluminum nitride membranes. In W. Piya-wattanametha, Y.-H. Park, Editoren, *SPIE Photonics West 2011*, volume 8616, Seite 861611, 2013. doi:10.1117/12.2005131.
- [93] D. Paetz, S. Leopold, M. Hoffmann, S. Sinzinger. Tunable anamorphic imaging system based on fluidic cylindrical lenses. In *International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*, Seiten 25–26. IEEE, 2014. doi:10.1109/OMN.2014.6924521.
- [94] W. N. Sharpe, J. Pulskamp, D. S. Gianola, C. Eberl, R. G. Polcawich, R. J. Thompson. Strain Measurements of Silicon Dioxide Microspecimens by Digital Imaging Processing. *Experimental Mechanics*, 47 (5), 649–658, 2007. doi:10.1007/s11340-006-9010-z.
- [95] T. Kobayashi, H. Saitoh, N. Fujii, Y. Hoshino, M. Takanashi. Porous membrane of polydimethylsiloxane by hydrosilylation cure: Characteristics of membranes having pores formed by hydrogen foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 50 (6), 971–979, 1993. doi:10.1002/app.1993.070500606.

- [96] A. Piruska, I. Nikcevic, S. H. Lee, C. Ahn, W. R. Heineman, P. a. Limbach, C. J. Seliskar. The autofluorescence of plastic materials and chips measured under laser irradiation. *Lab on a chip*, 5 (12), 1348–54, 2005. doi:10.1039/b508288a.
- [97] F. Schneider, T. Fellner, J. Wilde, U. Wallrabe. Mechanical properties of silicones for MEMS. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18 (6), 065008, 2008. doi:10.1088/0960-1317/18/6/065008.
- [98] J. Draheim, F. Schneider, R. Kamberger, C. Mueller, U. Wallrabe. Fabrication of a fluidic membrane lens system. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19 (9), 095013, 2009. doi:10.1088/0960-1317/19/9/095013.
- [99] S. Leopold, D. Paetz, S. Sinzinger. Adaptive Mikrolinsen basierend auf Aluminiumnitrid Membranen. In *MST-Kongress*, Seiten 173–176, 2013.
- [100] V. Mortet, M. Nesladek, K. Haenen, a. Morel, M. D'Olieslaeger, M. Vanecek. Physical properties of polycrystalline aluminium nitride films deposited by magnetron sputtering. *Diamond and Related Materials*, 13 (4-8), 1120–1124, 2004. doi:10.1016/j.diamond.2003.10.082.
- [101] S.-R. Jian, G.-J. Chen, T.-C. Lin. Berkovich Nanoindentation on AlN Thin Films. *Nanoscale research letters*, 5 (6), 935–40, 2010. doi:10.1007/s11671-010-9582-5.
- [102] A. F. Wright. Elastic properties of zinc-blende and wurtzite AlN, GaN, and InN. *Journal of Applied Physics*, 82 (6), 2833, 1997. doi:10.1063/1.366114.
- [103] L. Buchailot, E. Farnault, M. Hoummady, H. Fujita. Silicon Nitride Thin Films Young's Modulus Determination by an Optical Non Destructive Method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 36 (Part 2, No. 6B), L794–L797, 1997. doi:10.1143/JJAP.36.L794.
- [104] D. Schneider, M. Tucker. Non-destructive characterization and evaluation of thin films by laser-induced ultrasonic surface waves. *Thin Solid Films*, 290-291, 305–311, 1996. doi:10.1016/S0040-6090(96)09029-3.
- [105] S. Hong, T. P. Weihs, J. C. Bravman, W. D. Nix. Measuring stiffnesses and residual stresses of silicon nitride thin films. *Journal of Electronic Materials*, 19 (9), 903–909, 1990. doi:10.1007/BF02652915.
- [106] O. Williams, A. Kriele, J. Hees, M. Wolfer, W. Müller-Sebert, C. Nebel. High Young's modulus in ultra thin nanocrystalline diamond. *Chemical Physics Letters*, 495 (1-3), 84–89, 2010. doi:10.1016/j.cpllett.2010.06.054.
- [107] K. Zeng, F. Zhu, J. Hu, L. Shen, K. Zhang, H. Gong. Investigation of mechanical properties of transparent conducting oxide thin films. *Thin Solid Films*, 443 (1-2), 60–65, 2003. doi:10.1016/S0040-6090(03)00915-5.
- [108] S. K. Park, J. I. Han, D. G. Moon, W. K. Kim. Mechanical Stability of Externally Deformed Indium–Tin–Oxide Films on Polymer Substrates. *Japanese Journal of Applied Physics*, 42 (Part 1, No. 2A), 623–629, 2003. doi:10.1143/JJAP.42.623.

- [109] D. Gang Zong, C. Wo Ong, M. Aravind, M. Po Tsang, C. Loong Choy, D. Lu, D. Ma. Tensile strength of aluminium nitride films. *Philosophical Magazine*, 84 (31), 3353–3373, 2004. doi:10.1080/14786430412331283604.
- [110] R. L. Edwards, G. Coles, W. N. Sharpe. Comparison of Tensile and Bulge Tests for Thin-Film Silicon Nitride. *Experimental Mechanics*, 44 (1), 49–54, 2004. doi:10.1177/0014485104039749.
- [111] H. Li, B. W. Sheldon, A. Kothari, Z. Ban, B. L. Walden. Stress evolution in nanocrystalline diamond films produced by chemical vapor deposition. *Journal of Applied Physics*, 100 (9), 094309, 2006. doi:10.1063/1.2357992.
- [112] C. Peng, Z. Jia, D. Bianculli, T. Li, J. Lou. In situ electro-mechanical experiments and mechanics modeling of tensile cracking in indium tin oxide thin films on polyimide substrates. *Journal of Applied Physics*, 109 (10), 103530, 2011. doi:10.1063/1.3592341.
- [113] K. M. Taylor, C. Lenie. Some Properties of Aluminum Nitride. *Journal of The Electrochemical Society*, 107 (4), 308, 1960. doi:10.1149/1.2427686.
- [114] S. E. Lyshevski. *Nano- and Micro-Electromechanical Systems*. CRC Press, 2005.
- [115] K. Niihara, T. Hirai. Chemical vapour-deposited silicon nitride. *Journal of Materials Science*, 12 (6), 1243–1252, 1977. doi:10.1007/BF02426863.
- [116] J. E. Butler, A. V. Sumant. The CVD of Nanodiamond Materials. *Chemical Vapor Deposition*, 14 (7-8), 145–160, 2008. doi:10.1002/cvde.200700037.
- [117] Y. Goldberg. Aluminum Nitride (AlN). In M. E. Levinshtein, S. L. Rumyantsev, M. S. Shur, Editoren, *Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*, Kapitel 2, Seite 31. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001.
- [118] C. Chen, T. Chang, P. Liu, T. Tsai, H. Huang, J. Chen, C. Tseng, C. Liu, T. Tseng. Investigation of the electrical properties and reliability of amorphous SiCN. *Thin Solid Films*, 447-448, 632–637, 2004. doi:10.1016/j.tsf.2003.09.053.
- [119] C. Goldsmith, a. Sumant, O. Auciello, J. Carlisle, H. Zeng, J. Hwang, C. Palego, W. Wang, R. Carpick, V. Adiga, a. Datta, C. Gudeman, S. O'Brien, S. Sampath. Charging characteristics of ultra-nano-crystalline diamond in RF MEMS capacitive switches. *2010 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Seiten 1246–1249, 2010. doi:10.1109/MWSYM.2010.5517781.
- [120] N. M. Khusayfan, M. M. El-Nahass. Study of Structure and Electro-Optical Characteristics of Indium Tin Oxide Thin Films. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2013, 1–8, 2013. doi:10.1155/2013/408182.
- [121] A. N. Cleland, M. Pophristic, I. Ferguson. Single-crystal aluminum nitride nanomechanical resonators. *Applied Physics Letters*, 79 (13), 2070–2072, 2001. doi:10.1063/1.1396633.

- [122] G. Ziegler, J. Heinrich, G. Woetting. Relationships between processing, microstructure and properties of dense and reaction-bonded silicon nitride. *Journal of Materials Science*, 22 (9), 3041–3086, 1987. doi:10.1007/BF01161167.
- [123] L. Sekaric, J. M. Parpia, H. G. Craighead, T. Feygelson, B. H. Houston, J. Butler. Nanomechanical resonant structures in nanocrystalline diamond. *Applied Physics Letters*, 81 (23), 4455–4457, 2002. doi:10.1063/1.1526941.
- [124] S. K. Choi, J. I. Lee. Effect of film density on electrical properties of indium tin oxide films deposited by dc magnetron reactive sputtering. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 19 (5), 2043, 2001. doi:10.1116/1.1371326.
- [125] R. E. Sah, L. Kirste, M. Baeumler, P. Hiesinger, V. Cimalla, V. Lebedev. Investigation of Stress in AlN Thin Films for Piezoelectric MEMS. In *Nanotech 2010*, volume 2, Seiten 344–347, 2010.
- [126] J. Philip, P. Hess, T. Feygelson, J. Butler, S. Chattopadhyay, K. H. Chen, L. C. Chen. Elastic, mechanical, and thermal properties of nanocrystalline diamond films. *Journal of Applied Physics*, 93 (4), 2164–2171, 2003. doi:10.1063/1.1537465.
- [127] D. Neerinc, T. Vink. Depth profiling of thin ITO films by grazing incidence X-ray diffraction. *Thin Solid Films*, 278 (1-2), 12–17, 1996. doi:10.1016/0040-6090(95)08117-8.
- [128] T. Kamiya. Calculation of Crystal Structures, Dielectric Constants and Piezoelectric Properties of Wurtzite-Type Crystals Using Ab-Initio Periodic Hartree-Fock Method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 35 (Part 1, No. 8), 4421–4426, 1996. doi:10.1143/JJAP.35.4421.
- [129] K. Tonisch, V. Cimalla, C. Foerster, H. Romanus, O. Ambacher, D. Dontsov. Piezoelectric properties of polycrystalline AlN thin films for MEMS application. *Sensors and Actuators A: Physical*, 132 (2), 658–663, 2006. doi:10.1016/j.sna.2006.03.001.
- [130] O. Ambacher. Growth and applications of Group III-nitrides. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31 (20), 2653–2710, 1998. doi:10.1088/0022-3727/31/20/001.
- [131] K. Tsubouchi, K. Sugai, N. Mikoshiba. AlN Material Constants Evaluation and SAW Properties on AlN/Al₂O₃ and AlN/Si. *Proc. of SPIE*, Seiten 375–380, 1981.
- [132] V. Bermudez. Theoretical study of the electronic structure of the Si₃N₄(0001) surface. *Surface Science*, 579 (1), 11–20, 2005. doi:10.1016/j.susc.2005.01.025.
- [133] J. Robertson. Deposition of diamond-like carbon. In A. Lettington, J. W. Steeds, Editoren, *Thin Film Diamond*, Kapitel 9, Seiten 107–116. Chapman & Hall for The Royal Society, 1994.
- [134] S. Ray, R. Banerjee, N. Basu, a. K. Batabyal, a. K. Barua. Properties of tin doped indium oxide thin films prepared by magnetron sputtering. *Journal of Applied Physics*, 54 (6), 3497, 1983. doi:10.1063/1.332415.

- [135] H. Joo, H. Kim, S. Kim, S. Kim. The optical and structural properties of AlN thin films characterized by spectroscopic ellipsometry. *Thin Solid Films*, 368 (1), 67–73, 2000. doi:10.1016/S0040-6090(00)00712-4.
- [136] H. R. Philipp. Optical Properties of Silicon Nitride. *Journal of The Electrochemical Society*, 120 (2), 295, 1973. doi:10.1149/1.2403440.
- [137] R. Bogdanowicz. Characterization of Optical and Electrical Properties of Transparent Conductive Boron-Doped Diamond thin Films Grown on Fused Silica. *Metrology and Measurement Systems*, 21 (4), 685–698, 2014. doi:10.2478/mms-2014-0059.
- [138] M. Mizuhashi. Electrical properties of vacuum-deposited indium oxide and indium tin oxide films. *Thin Solid Films*, 70 (1), 91–100, 1980. doi:10.1016/0040-6090(80)90415-0.
- [139] W. M. Yim, R. J. Paff. Thermal expansion of AlN, sapphire, and silicon. *Journal of Applied Physics*, 45 (3), 1456, 1974. doi:10.1063/1.1663432.
- [140] T.-Y. Tien. Use of Phase Diagrams in the Study of Silicon Nitride Ceramics. In A. M. Alper, Editor, *Phase Diagrams in Advanced Ceramics*, Kapitel 4, Seiten 127–155. Academic Press, London, 1995.
- [141] C. Wild, E. Woerner. *The CVD diamond booklet*. Diamond Materials GmbH, 2008.
- [142] Y.-G. Kim, J.-W. Ryu, J.-H. Song, K.-W. Lee, Y.-Y. Kim. Laser-Induced Polymer Removal and Transmittance Enhancement of an Indium-Tin-Oxide (ITO) Film by Reduction of Surface Roughness. *Journal of the Korean Physical Society*, 49 (1), 393, 2006. doi:10.3938/jkps.49.393.
- [143] N. Ben Hassine, D. Mercier, P. Renaux, G. Parat, S. Basrour, P. Waltz, C. Chappaz, P. Ancey, S. Blonkowski. Dielectrical properties of metal-insulator-metal aluminum nitride structures: Measurement and modeling. *Journal of Applied Physics*, 105 (4), 044111, 2009. doi:10.1063/1.3081977.
- [144] T. Adam, J. Kolodzey, C. Swann, M. Tsao, J. Rabolt. The electrical properties of MIS capacitors with ALN gate dielectrics. *Applied Surface Science*, 175-176, 428–435, 2001. doi:10.1016/S0169-4332(01)00091-5.
- [145] C. Wang, N.-Y. Kim. Fabrication of Metal-insulator-metal Capacitors with SiN_x Thin Films Deposited by Plasma-enhanced Chemical Vapor Deposition. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 10 (5), 147–151, 2009. doi:10.4313/TEEM.2009.10.5.147.
- [146] C. J. Wort, R. S. Balmer. Diamond as an electronic material. *Materials Today*, 11 (1-2), 22–28, 2008. doi:10.1016/S1369-7021(07)70349-8.
- [147] N. R. C. Committee on Materials for High-Temperature Semiconductor Devices, Commission on Engineering and Technical Systems. *Materials for High-Temperature Semiconductor Devices*. National Academy Press, Washington, D.C., 1995.

- [148] Y. Taniyasu, M. Kasu, T. Makimoto. An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres. *Nature*, 441 (7091), 325–8, 2006. doi:10.1038/nature04760.
- [149] R. Mahameed, N. Sinha, M. B. Pisani, G. Piazza. Dual-beam actuation of piezoelectric AlN RF MEMS switches monolithically integrated with AlN contour-mode resonators. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18 (10), 105011, 2008. doi:10.1088/0960-1317/18/10/105011.
- [150] G. Piazza, P. J. Stephanou, A. P. Pisano. Single-Chip Multiple-Frequency ALN MEMS Filters Based on Contour-Mode Piezoelectric Resonators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 16 (2), 319–328, 2007. doi:10.1109/JMEMS.2006.889503.
- [151] A. Andrei, K. Krupa, M. Jozwik, P. Delobelle, L. Hirsinger, C. Gorecki, L. Nieradko, C. Meunier. AlN as an actuation material for MEMS applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 141 (2), 565–576, 2008. doi:10.1016/j.sna.2007.10.041.
- [152] M.-A. Dubois, P. Muralt. Properties of aluminum nitride thin films for piezoelectric transducers and microwave filter applications. *Applied Physics Letters*, 74 (20), 3032, 1999. doi:10.1063/1.124055.
- [153] J. C. Doll, B. C. Petzold, B. Ninan, R. Mullapudi, B. L. Pruitt. Aluminum nitride on titanium for CMOS compatible piezoelectric transducers. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20 (2), 25008, 2010. doi:10.1088/0960-1317/20/2/025008.
- [154] P.-H. Wu, I.-K. Lin, H.-Y. Yan, K.-S. Ou, K.-S. Chen, X. Zhang. Mechanical property characterization of sputtered and plasma enhanced chemical deposition (PECVD) silicon nitride films after rapid thermal annealing. *Sensors and Actuators A: Physical*, 168 (1), 117–126, 2011. doi:10.1016/j.sna.2011.03.043.
- [155] R. P. Mildren, J. R. Rabeau, Editoren. *Optical Engineering of Diamond*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2013.
- [156] T. A. Railkar, W. P. Kang, H. Windischmann, A. P. Malshe, H. A. Naseem, J. L. Davidson, W. D. Brown. A Critical Review of Chemical Vapor-Deposited (CVD) Diamond for Electronic Applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 25 (3), 163–277, 2000. doi:10.1080/10408430008951119.
- [157] O. Auciello, S. Pacheco, A. Sumant, C. Gudeman, S. Sampath, A. Datta, R. Carpick, V. Adiga, P. Zurcher, Z. Ma, H.-c. Yuan, J. Carlisle, B. Kabius, J. Hiller, S. Srinivasan. Are Diamonds a MEMS' Best Friend? *IEEE Microwave Magazine*, 8 (6), 61–75, 2007. doi:10.1109/MMM.2007.907816.
- [158] J. K. Luo, Y. Q. Fu, H. R. Le, J. a. Williams, S. M. Spearing, W. I. Milne. Diamond and diamond-like carbon MEMS. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17 (7), S147–S163, 2007. doi:10.1088/0960-1317/17/7/S12.
- [159] J. Kusterer, A. Lüker, P. Herfurth, Y. Men, W. Ebert, P. Kirby, M. O'Keefe, E. Kohn. Piezo-actuated nanodiamond cantilever technology for high-speed applications. *Diamond and Related Materials*, 17 (7-10), 1429–1433, 2008. doi:10.1016/j.diamond.2008.01.119.

- [160] C. Granqvist, A. Hultaker. Transparent and conducting ITO films: new developments and applications. *Thin Solid Films*, 411 (1), 1–5, 2002. doi:10.1016/S0040-6090(02)00163-3.
- [161] P. D. C. King, T. D. Veal. Conductivity in transparent oxide semiconductors. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 23 (33), 334214, 2011. doi:10.1088/0953-8984/23/33/334214.
- [162] S. Yi, S. C. Ur, E. S. Kim. Performance of Packaged Piezoelectric Microspeakers Depending on the Material Properties. In *IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Seiten 765–768. IEEE, 2009. doi:10.1109/ MEMSYS.2009.4805495.
- [163] H. Cho, S. Ur, M. Yoon, S. Yi. Dependence of material properties on piezoelectric microspeakers with AlN thin film. In *3rd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Seiten 637–640. IEEE, 2008. doi:10.1109/NEMS.2008.4484412.
- [164] K. Seo, J. Park, H. Kim, D. Kim, S. Ur, S. Yi. Micromachined piezoelectric microspeakers fabricated with high quality AlN thin film. *Integrated Ferroelectrics*, 95 (1), 74–82, 2007. doi:10.1080/10584580701756524.
- [165] I. Kone, F. Domingue, A. Reinhardt, H. Jacquinet, M. Borel, M. Gorisse, G. Parat, F. Casset, D. Pellissier-Tanon, J. F. Carpentier, L. Buchailot, B. Dubus. Guided acoustic wave resonators using an acoustic Bragg mirror. *Applied Physics Letters*, 96 (22), 223504, 2010. doi:10.1063/1.3440370.
- [166] V. Mortet, a. Soltani, a. Talbi, P. Pobedinskas, K. Haenen, J.-C. De Jaeger, P. Pernod, P. Wagner. AlN on nanocrystalline diamond piezoelectric cantilevers for sensors/actuators. *Procedia Chemistry*, 1 (1), 40–43, 2009. doi:10.1016/j.proche.2009.07.010.
- [167] M. Zalazar, P. Gurman, J. Park, D. Kim, S. Hong, L. Stan, R. Divan, D. Czaplewski, O. Auciello. Integration of piezoelectric aluminum nitride and ultrananocrystalline diamond films for implantable biomedical microelectromechanical devices. *Applied Physics Letters*, 102 (10), 104101, 2013. doi:10.1063/1.4792238.
- [168] V. Mortet, O. Williams, K. Haenen. Diamond-Based Acoustic Devices. In S. Koizumi, C. E. Nebel, M. Nesladek, Editoren, *Physics and Applications of CVD Diamond*, Kapitel 7, Seiten 177–194. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.
- [169] F. Bénédic, M. Assouar, P. Kirsch, D. Monéger, O. Brinza, O. Elmazria, P. Alnot, a. Gicquel. Very high frequency SAW devices based on nanocrystalline diamond and aluminum nitride layered structure achieved using e-beam lithography. *Diamond and Related Materials*, 17 (4-5), 804–808, 2008. doi:10.1016/j.diamond.2007.10.015.
- [170] C. R. Miskys, J. a. Garrido, M. Hermann, M. Eickhoff, C. E. Nebel, M. Stutzmann, G. Vogg. Structural and interface properties of an AlN diamond ultraviolet light

- emitting diode. *Applied Physics Letters*, 85 (17), 3699, 2004. doi:10.1063/1.1811382.
- [171] Q.-M. Wang, L. E. Cross. Performance analysis of piezoelectric cantilever bending actuators. *Ferroelectrics*, 215 (1), 187–213, 1998. doi:10.1080/00150199808229562.
- [172] M. Brissaud, S. Ledren, P. Gonnard. Modelling of a cantilever non-symmetric piezoelectric bimorph. 832, 2003.
- [173] S. Borodinas, P. Vasiljev, D. Mazeika. The optimization of a symmetrical coplanar trimorph piezoelectric actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 200, 133–137, 2013. doi:10.1016/j.sna.2012.09.010.
- [174] S.-Y. Lee, B. Ko, W. Yang. Theoretical modeling, experiments and optimization of piezoelectric multimorph. *Smart Materials and Structures*, 14 (6), 1343–1352, 2005. doi:10.1088/0964-1726/14/6/026.
- [175] C. Sawyer. The Use of Rochelle Salt Crystals for Electrical Reproducers and Microphones. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, 19 (11), 2020–2029, 1931. doi:10.1109/JRPROC.1931.222262.
- [176] R. G. Ballas. *Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [177] F. Knoebber, O. Bludau, C.-C. Roehlig, R. E. Sah, O. a. Williams, L. Kirste, S. Leopold, D. Paetz, V. Cimalla, O. Ambacher, V. Lebedev. Dynamic characterization of thin aluminum nitride microstructures. *Physica Status Solidi (C)*, 8 (2), 479–481, 2011. doi:10.1002/pssc.201000512.
- [178] F. Knoebber. *Entwicklung piezoelektrisch adaptiver Aluminiumnitrid/Diamant-Linsen für mikrooptische Systeme*. Dissertation, unpubliziert.
- [179] W. Kleber, H.-J. Bausch, J. Bohm, D. Klimm. *Einführung in die Kristallographie*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 19. Edition, 2010.
- [180] J. Nye. *Physical properties of crystals: their representation by tensors and matrices*. Clarendon Press, Oxford, 1957.
- [181] Collaboration: Authors and editors of the volumes III/17A-22A-41A1a. Aluminum nitride (AlN) structure. In O. Madelung, U. Rössler, M. Schulz, Editoren, *Group IV Elements, IV-IV and III-V Compounds. Part a - Lattice Properties*, Seiten 1–3. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001. doi:10.1007/10551045_33.
- [182] M. Kazan, E. Moussaed, R. Nader, P. Masri. Elastic constants of aluminum nitride. *physica status solidi (c)*, 4 (1), 204–207, 2007. doi:10.1002/pssc.200673503.
- [183] F. Bernardini, V. Fiorentini. First-principles calculation of the piezoelectric tensor of III–V nitrides. *Applied Physics Letters*, 80 (22), 4145, 2002. doi:10.1063/1.1482796.

- [184] V. Cimalla, J. Pezoldt, O. Ambacher. Group III nitride and SiC based MEMS and NEMS: materials properties, technology and applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40 (20), 6386–6434, 2007. doi:10.1088/0022-3727/40/20/S19.
- [185] M. Stutzmann, O. Ambacher, M. Eickhoff, U. Karrer, A. Lima Pimenta, R. Neuberger, J. Schalwig, R. Dimitrov, P. J. Schuck, R. D. Grober. Playing with Polarity. *physica status solidi (b)*, 228 (2), 505–512, 2001. doi:10.1002/1521-3951(200111)228:2<505::AID-PSSB505>3.0.CO;2-U.
- [186] M. Akiyama, T. Kamohara, N. Ueno, M. Sakamoto, K. Kano, A. Teshigahara, N. Kawahara. Polarity inversion in aluminum nitride thin films under high sputtering power. *Applied Physics Letters*, 90 (15), 151910, 2007. doi:10.1063/1.2721865.
- [187] D. Fuhrmann. *Limitierende Mechanismen für (Ga,Al,In)N-basierte LED-Strukturen im grünen und ultravioletten Spektralbereich*. Dissertation, Universität Göttingen, 2008.
- [188] C.-M. Zetterling, M. Oestling, K. Wongchotigul, M. G. Spencer, X. Tang, C. I. Harris, N. Nordell, S. S. Wong. Investigation of aluminum nitride grown by metal-organic chemical-vapor deposition on silicon carbide. *Journal of Applied Physics*, 82 (6), 2990, 1997. doi:10.1063/1.366136.
- [189] J. K. Liu, K. M. Lakin, K. L. Wang. Growth morphology and surface-acoustic-wave measurements of AlN films on sapphire. *Journal of Applied Physics*, 46 (9), 3703, 1975. doi:10.1063/1.322169.
- [190] G. Koblmüller, R. Averbeck, L. Geelhaar, H. Riechert, W. Hoesler, P. Pongratz. Growth diagram and morphologies of AlN thin films grown by molecular beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*, 93 (12), 9591, 2003. doi:10.1063/1.1575929.
- [191] R. D. Vispute, J. Narayan, H. Wu, K. Jagannadham. Epitaxial growth of AlN thin films on silicon (111) substrates by pulsed laser deposition. *Journal of Applied Physics*, 77 (9), 4724, 1995. doi:10.1063/1.359441.
- [192] E. Iborra, J. Olivares, M. Clement, L. Vergara, a. Sanz-Hervás, J. Sangrador. Piezoelectric properties and residual stress of sputtered AlN thin films for MEMS applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 115 (2-3), 501–507, 2004. doi:10.1016/j.sna.2004.03.053.
- [193] G. Iriarte, J. Rodríguez, F. Calle. Synthesis of c-axis oriented AlN thin films on different substrates: A review. *Materials Research Bulletin*, 45 (9), 1039–1045, 2010. doi:10.1016/j.materresbull.2010.05.035.
- [194] W. Menz, J. Mohr, O. Paul. *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 3. Edition, 2005.
- [195] T. Kamohara, M. Akiyama, N. Kuwano. Influence of polar distribution on piezoelectric response of aluminum nitride thin films. *Applied Physics Letters*, 92 (9), 093506, 2008. doi:10.1063/1.2892041.

- [196] F. Engelmark, G. Fucntes, I. V. Katardjiev, a. Harsta, U. Smith, S. Berg. Synthesis of highly oriented piezoelectric AlN films by reactive sputter deposition. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 18 (4), 1609, 2000. doi:10.1116/1.582394.
- [197] K. Kusaka, D. Taniguchi, T. Hanabusa, K. Tominaga. Effect of sputtering gas pressure and nitrogen concentration on crystal orientation and residual stress in sputtered AlN films. *Vacuum*, 66 (3-4), 441–446, 2002. doi:10.1016/S0042-207X(02)00168-9.
- [198] C. Chuang, C. Chao, R. Chang, K. Chu. Effects of internal stresses on the mechanical properties of deposition thin films. *Journal of Materials Processing Technology*, 201 (1-3), 770–774, 2008. doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.11.258.
- [199] G. G. Stoney. The Tension of Metallic Films Deposited by Electrolysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 82 (553), 172–175, 1909. doi:10.1098/rspa.1909.0021.
- [200] F. Martin, P. Mural, M.-a. Dubois, a. Pezous. Thickness dependence of the properties of highly c-axis textured AlN thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 22 (2), 361, 2004. doi:10.1116/1.1649343.
- [201] H. Shin, J.-T. Song. Piezoelectric Coefficient Measurement of AlN Thin Films at the Nanometer Scale using Piezoresponse Force Microscopy. *Journal of the Korean Physical Society*, 56 (2), 580, 2010. doi:10.3938/jkps.56.580.
- [202] L. Vergara, J. Olivares, E. Iborra, M. Clement, a. Sanz-Hervás, J. Sangrador. Effect of rapid thermal annealing on the crystal quality and the piezoelectric response of polycrystalline AlN films. *Thin Solid Films*, 515 (4), 1814–1818, 2006. doi:10.1016/j.tsf.2006.07.002.
- [203] M. A. Ahmad, R. Plana. Piezoelectric Coefficients of Thin Film Aluminum Nitride Characterizations Using Capacitance Measurements. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 19 (3), 140–142, 2009. doi:10.1109/LMWC.2009.2013682.
- [204] M. Stewart, M. G. Cain. *Characterisation of Ferroelectric Bulk Materials and Thin Films*, volume 2 of *Springer Series in Measurement Science and Technology*. Springer Netherlands, volume 2 Edition, 2014. doi:10.1007/978-1-4020-9311-1.
- [205] K. Brueckner, F. Niebelschuetz, K. Tonisch, C. Foerster, V. Cimalla, R. Stephan, J. Pezoldt, T. Stauden, O. Ambacher, M. a. Hein. Micro- and nano-electromechanical resonators based on SiC and group III-nitrides for sensor applications. *Physica Status Solidi (a)*, 208 (2), 357–376, 2011. doi:10.1002/pssa.201026343.
- [206] O. P. Agnihotri, A. K. Sharma, B. K. Gupta, R. Thangaraj. The effect of tin additions on indium oxide selective coatings. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 11 (5), 643–647, 1978. doi:10.1088/0022-3727/11/5/008.
- [207] M. Vila, D. Caceres, C. Prieto. Mechanical properties of sputtered silicon nitride thin films. *Journal of Applied Physics*, 94 (12), 7868, 2003. doi:10.1063/1.1626799.

- [208] H. Huang, K. Winchester, a. Suvorova, B. Lawn, Y. Liu, X. Hu, J. Dell, L. Faraone. Effect of deposition conditions on mechanical properties of low-temperature PECVD silicon nitride films. *Materials Science and Engineering: A*, 435-436, 453–459, 2006. doi:10.1016/j.msea.2006.07.015.
- [209] G. N. Parsons, J. H. Souk, J. Batey. Low hydrogen content stoichiometric silicon nitride films deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Journal of Applied Physics*, 70 (3), 1553, 1991. doi:10.1063/1.349544.
- [210] C. Kittel. *Einführung in die Festkörperphysik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, München, 2006.
- [211] O. Ambacher, J. Majewski, C. Miskys, A. Link, M. Hermann, M. Eickhoff, M. Stutzmann, F. Bernardini, V. Fiorentini, V. Tilak, B. Schaff, L. F. Eastman. Pyroelectric properties of Al(In)GaN/GaN hetero- and quantum well structures. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 14 (13), 3399–3434, 2002. doi:10.1088/0953-8984/14/13/302.
- [212] J.-M. Wagner, F. Bechstedt. Properties of strained wurtzite GaN and AlN: Ab initio studies. *Physical Review B*, 66 (11), 115202, 2002. doi:10.1103/PhysRevB.66.115202.
- [213] M. G. Allen, M. Mehregany, R. T. Howe, S. D. Senturia. Microfabricated structures for the in situ measurement of residual stress, Young's modulus, and ultimate strain of thin films. *Applied Physics Letters*, 51 (4), 241, 1987. doi:10.1063/1.98460.
- [214] H. Li, J. J. Vlassak. Determining the elastic modulus and hardness of an ultra-thin film on a substrate using nanoindentation. *Journal of Materials Research*, 24 (03), 1114–1126, 2011. doi:10.1557/jmr.2009.0144.
- [215] S. Gravier, M. Coulombier, A. Safi, N. Andre, A. Boe, J.-P. Raskin, T. Pardoën. New On-Chip Nanomechanical Testing Laboratory - Applications to Aluminum and Polysilicon Thin Films. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 18 (3), 555–569, 2009. doi:10.1109/JMEMS.2009.2020380.
- [216] M. Datcheva, S. Cherneva, M. Stoycheva, R. Iankov, D. Stoychev. Determination of Anodized Aluminum Material Characteristics by Means of Nano-Indentation Measurements. *Materials Sciences and Applications*, 02 (10), 1452–1464, 2011. doi:10.4236/msa.2011.210196.
- [217] W. Oliver, G. Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7 (06), 1564–1583, 1992. doi:10.1557/JMR.1992.1564.
- [218] W. Oliver, G. Pharr. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 19 (01), 3–20, 2004. doi:10.1557/jmr.2004.19.1.3.
- [219] I. N. Sneddon. The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile. *International Journal of Engineering Science*, 3 (1), 47–57, 1965. doi:10.1016/0020-7225(65)90019-4.

- [220] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger. *Theory of plates and shells*. Mc, 2nd Edition, 1959.
- [221] J. W. Beams. Mechanical properties of thin films of gold and silver. In C. A. Neugebauer, Editor, *Structure and properties of thin films*, Seiten 183–192. John Wiley & Sons, New York, 1959.
- [222] E. I. Bromley. A technique for the determination of stress in thin films. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1 (4), 1364, 1983. doi:10.1116/1.582744.
- [223] M. K. Small, W. D. Nix. Analysis of the accuracy of the bulge test in determining the mechanical properties of thin films. *Journal of Materials Research*, 7 (06), 1553–1563, 1992. doi:10.1557/JMR.1992.1553.
- [224] F. Laermer, A. Schilp, K. Funk, M. Offenbergl. Bosch deep silicon etching: improving uniformity and etch rate for advanced MEMS applications. In *Twelfth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems 1999*, Seiten 211–216. IEEE, 1999. doi:10.1109/MEMSYS.1999.746812.
- [225] N. Schwesinger, C. Dehne, F. Adler. *Lehrbuch Mikrosystemtechnik*. Oldenbourg Verlag, München, 2009.
- [226] W. Jacob, A. von Keudell, T. Schwarz-Selinger. Infrared analysis of thin films: amorphous, hydrogenated carbon on silicon. *Brazilian Journal of Physics*, 30 (3), 508–516, 2000. doi:10.1590/S0103-97332000000300006.
- [227] V. Zuerbig, D. Paetz, J. Fries, M. Bichra, W. Pletschen, K. Holc, M. Reusch, C. E. Nebel, S. Sinzinger, O. Ambacher, V. Lebedev. Tunable multisegment SixNy/AlN piezo lenses for wavefront correction. In IEEE, Editor, *18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*, Seiten 2045–2048. IEEE, 2015. doi:10.1109/TRANSDUCERS.2015.7181358.
- [228] K. J. Owen, B. VanDerElzen, R. L. Peterson, K. Najafi. High aspect ratio deep silicon etching. In *IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, number February, Seiten 251–254. IEEE, 2012. doi:10.1109/MEMSYS.2012.6170138.
- [229] C. AB. COMSOL Multiphysics 4.4 Reference Manual, 2013.
- [230] N. Kumari, A. K. Singh, P. K. Barhai. Study of Properties of AlN Thin Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering. *International Journal of Thin Films Science and Technology*, 3 (2), 43–49, 2014. doi:10.12785/ijtfst/030203.
- [231] Polytec GmbH. *Handbuch Faseroptischer Vibrometer Messkopf OFV-551/-552*. Polytec GmbH, 2009.
- [232] Polytec GmbH. *Handbuch Vibrometer MSA 500*. Polytec GmbH, 2009.
- [233] B. C. Platt, R. Shack. History and Principles of Shack-Hartmann Wavefront Sensing. *Journal of Refractive Surgery*, 17 (5), 573–577, 2001. doi:10.3928/1081-597X-20010901-13.

- [234] M. Hettwer. Der Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor- Aufbau, Funktion und Anwendung. *Laser Technik Journal*, 1 (2), 60–62, 2004. doi:10.1002/latj.200790018.
- [235] L. Seifert, H. Tiziani, W. Osten. Wavefront reconstruction with the adaptive Shack–Hartmann sensor. *Optics Communications*, 245 (1-6), 255–269, 2005. doi:10.1016/j.optcom.2004.09.074.
- [236] S. Abado. Two-dimensional high-bandwidth Shack-Hartmann wavefront sensor: design guidelines and evaluation testing. *Optical Engineering*, 49 (6), 064403, 2010. doi:10.1117/1.3454383.
- [237] F. Zernike. Beugungstheorie des Schneideverfahrens und seiner verbesserten Form der Phasenkontrastmethode. *Physika*, 8, 689, 1934.
- [238] R. J. Noll. Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *Journal of the Optical Society of America*, 66 (3), 207, 1976. doi:10.1364/JOSA.66.000207.
- [239] P.-Y. Madec. Overview of Deformable Mirror Technologies for Adaptive Optics. In *Imaging and Applied Optics 2015*, number March, Seite AOTh2C.1, Washington, D.C., 2015. OSA. doi:10.1364/AOMS.2015.AOTh2C.1.
- [240] D. Dägel, W. Cowan, O. Spahn, G. Grossetete, A. Grine, M. Shaw, P. Resnick, B. Jokiel. Large-Stroke MEMS Deformable Mirrors for Adaptive Optics. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 15 (3), 572–583, 2006. doi:10.1109/JMEMS.2006.876794.
- [241] A. Pritchard. *The Microscopic Cabinet of Selected Animated Objects; with A Description of the Jewel and Doublet Microscope, Test Objects, &C.* Whittaker, Treacher, and Arnot, Ave-Maria-Lane, London, 1832.
- [242] C. Lee, H. Choi, E. Gu, M. Dawson, H. Murphy. Fabrication and characterization of diamond micro-optics. *Diamond and Related Materials*, 15 (4-8), 725–728, 2006. doi:10.1016/j.diamond.2005.09.033.
- [243] C. Lee, M. Dawson, E. Gu. Diamond double-sided micro-lenses and reflection gratings. *Optical Materials*, 32 (9), 1123–1129, 2010. doi:10.1016/j.optmat.2010.03.013.
- [244] H. W. Choi, E. Gu, C. Liu, C. Griffin, J. M. Girkin, I. M. Watson, M. D. Dawson. Fabrication of natural diamond microlenses by plasma etching. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 23 (1), 130, 2005. doi:10.1116/1.1843826.
- [245] C. Lee, E. Gu, M. Dawson. Micro-cylindrical and micro-ring lenses in CVD diamond. *Diamond and Related Materials*, 16 (4-7), 944–948, 2007. doi:10.1016/j.diamond.2006.11.027.
- [246] M. Karlsson, F. Nikolajeff. Diamond micro-optics: microlenses and antireflection structured surfaces for the infrared spectral region. *Optics Express*, 11 (5), 502, 2003. doi:10.1364/OE.11.000502.

- [247] E. Woerner, C. Wild, W. Mueller-Sebert, P. Koidl. CVD-diamond optical lenses. *Diamond and Related Materials*, 10 (3-7), 557–560, 2001. doi:10.1016/S0925-9635(00)00393-9.
- [248] V. Zuerbig, J. Hees, W. Pletschen, R. Sah, M. Wolfer, L. Kirste, N. Heidrich, C. Nebel, O. Ambacher, V. Lebedev. Elastic properties of ultrathin diamond/AlN membranes. *Thin Solid Films*, 558, 267–271, 2014. doi:10.1016/j.tsf.2014.03.015.
- [249] F. Bundy. Pressure-temperature phase diagram of elemental carbon. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 156 (1), 169–178, 1989. doi:10.1016/0378-4371(89)90115-5.
- [250] J. C. Angus. A short history of diamond synthesis. In A. A. Paoletti, Editor, *The physics of Diamond*, Seiten 1–8. IOS Press, 1997.
- [251] H. O. A. Meyer, M. Seal. Mined Diamond. In M. A. Prelas, G. Popovici, L. K. Bigelow, Editoren, *Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films*, Kapitel 10, Seite 481. Marcel Dekker Inc., 1998.
- [252] J. C. Angus. Structure and thermochemistry of diamond. In A. Paoletti, Editor, *The Physics of Diamond*, Seiten 9–30. IOS Press, 1997.
- [253] G. Davies, T. Evans. Graphitization of Diamond at Zero Pressure and at a High Pressure. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 328 (1574), 413–427, 1972. doi:10.1098/rspa.1972.0086.
- [254] J. C. Angus. Growth of Diamond Seed Crystals by Vapor Deposition. *Journal of Applied Physics*, 39 (6), 2915, 1968. doi:10.1063/1.1656693.
- [255] K. Kobashi. *Diamond Films*. Elsevier Ltd, 2005.
- [256] O. Williams. Nanocrystalline diamond. *Diamond and Related Materials*, 20 (5-6), 621–640, 2011. doi:10.1016/j.diamond.2011.02.015.
- [257] V. Zuerbig, W. Pletschen, J. Hees, R. Sah, L. Kirste, N. Heidrich, C. Nebel, O. Ambacher, V. Lebedev. Transparent diamond electrodes for tunable micro-optical devices. *Diamond and Related Materials*, 38, 101–103, 2013. doi:10.1016/j.diamond.2013.06.010.
- [258] USGS. Minerals yearbook 2000. Bericht, U.S. Department of the Interior; U.S. Geological survey, 2000.
- [259] USGS. 2010 Minerals Yearbook. Bericht June, U.S. Department of the Interior; U.S. Geological survey, 2010.
- [260] USGS. Mineral Commodity Summaries 2015. Bericht 703, U.S. Department of the Interior; U.S. Geological survey, 2015.
- [261] S. Koizumi, C. E. Nebel, M. Nesladek, Editoren. *Physics and Applications of CVD Diamond*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.

- [262] W. Gajewski, P. Achatz, O. Williams, K. Haenen, E. Bustarret, M. Stutzmann, J. Garrido. Electronic and optical properties of boron-doped nanocrystalline diamond films. *Physical Review B*, 79 (4), 045206, 2009. doi:10.1103/PhysRevB.79.045206.
- [263] G. L. Pearson, J. Bardeen. Electrical Properties of Pure Silicon and Silicon Alloys Containing Boron and Phosphorus. *Physical Review*, 75 (5), 865–883, 1949. doi:10.1103/PhysRev.75.865.
- [264] N. F. Mott. *Metal-Insulator Transitions*. Taylor & Francis Ltd, London, 2 Edition, 1990.
- [265] J. J. Hees. *All-Diamond Nanoelectrode Arrays*. Dissertation, University of Freiburg, 2012.
- [266] L. J. van der Pauw. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape. *Philips Research Report*, 13 (1), 1–9, 1958.
- [267] N. F. Mott. Conduction in non-crystalline materials. *Philosophical Magazine*, 19 (160), 835–852, 1969. doi:10.1080/14786436908216338.
- [268] B. V. Derjaguin, B. V. Spitsyn, L. L. Bouliov, A. A. Klochkov, A. V. Smolyaniov. No Title. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, Seiten 231–233, 1976.
- [269] B. V. Derjaguin, D. B. Fedoseev. Growth of diamond and graphite from the gasphase. *Nauka*, 1977.
- [270] B. Spitsyn, L. Bouilov, B. Derjaguin. Vapor growth of diamond on diamond and other surfaces. *Journal of Crystal Growth*, 52, 219–226, 1981. doi:10.1016/0022-0248(81)90197-4.
- [271] S. Matsumoto, Y. Sato, M. Kamo, N. Setaka. Vapor Deposition of Diamond Particles from Methane. *Japanese Journal of Applied Physics*, 21 (Part 2, No. 4), L183, 1982. doi:10.1143/JJAP.21.L183.
- [272] J. C. Angus, A. Argoitia, R. Gat, Z. Li, M. Sunkara, L. Wang, Y. Wang. Chemical vapour deposition of diamond. In A. Lettington, J. Steeds, Editoren, *Thin Film Diamond*, Kapitel 1, Seiten 1–14. Chapman & Hall for The Royal Society, 1994.
- [273] R. Haubner, B. Lux. Diamond growth by hot-filament chemical vapor deposition: state of the art. *Diamond and Related Materials*, 2 (9), 1277–1294, 1993. doi:10.1016/0925-9635(93)90008-P.
- [274] M. Fuener, C. Wild, P. Koidl. Novel microwave plasma reactor for diamond synthesis. *Applied Physics Letters*, 72 (10), 1149–1151, 1998. doi:10.1063/1.120997.
- [275] J. E. Butler, R. L. Woodin, L. M. Brown, P. Fallon. Thin Film Diamond Growth Mechanisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 342 (1664), 209–224, 1993. doi:10.1098/rsta.1993.0015.

- [276] J. Butler, Y. Mankelevich, A. Cheesman, J. Ma, M. Ashfold. Understanding the chemical vapor deposition of diamond: recent progress. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 21 (36), 364201, 2009. doi:10.1088/0953-8984/21/36/364201.
- [277] J. Achard, F. Silva, a. Tallaire, X. Bonnin, G. Lombardi, K. Hassouni, a. Gicquel. High quality MPACVD diamond single crystal growth: high microwave power density regime. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40 (20), 6175–6188, 2007. doi:10.1088/0022-3727/40/20/S04.
- [278] J. Butler, R. Woodin. Thin film diamond growth mechanisms. In A. Lettington, J. Steeds, Editoren, *Thin Film Diamond*, Seiten 15–30. Springer Netherlands, 1994. doi:10.1007/978-94-011-0725-9_2.
- [279] H. Liu, D. S. Dandy. Studies on nucleation process in diamond CVD: an overview of recent developments. *Diamond and Related Materials*, 4 (10), 1173–1188, 1995. doi:10.1016/0925-9635(96)00297-2.
- [280] J. Hees, A. Kriele, O. a. Williams. Electrostatic self-assembly of diamond nanoparticles. *Chemical Physics Letters*, 509 (1-3), 12–15, 2011. doi:10.1016/j.cpllett.2011.04.083.
- [281] J. Hees, N. Heidrich, W. Pletschen, R. E. Sah, M. Wolfer, O. a. Williams, V. Lebedev, C. E. Nebel, O. Ambacher. Piezoelectric actuated micro-resonators based on the growth of diamond on aluminum nitride thin films. *Nanotechnology*, 24 (2), 025601, 2013. doi:10.1088/0957-4484/24/2/025601.
- [282] C. Wild, N. Herres, P. Koidl. Texture formation in polycrystalline diamond films. *Journal of Applied Physics*, 68 (3), 973, 1990. doi:10.1063/1.346663.
- [283] F. Knoebber, V. Zuerbig, N. Heidrich, J. Hees, R. E. Sah, M. Baeumler, S. Leopold, D. Paetz, O. Ambacher, V. Lebedev. Static and dynamic characterization of AlN and nanocrystalline diamond membranes. *Physica Status Solidi (a)*, 209 (10), 1–8, 2012. doi:10.1002/pssa.201228180.
- [284] A. Van Der Drift. Evolutionary selection, a principle governing growth orientation in vapour-deposited layers. *Philips Research Report*, 22, 267, 1967.
- [285] T. Yoshikawa, V. Zuerbig, M. Reusch, J.-C. Arnault, K.-H. Lee, M. Couty, M. Bickermann, C. E. Nebel, O. Ambacher, V. Lebedev. Nanodiamond seeding on different polarities of aluminum nitride. *in Vorbereitung*, 2016.
- [286] A. Ferrari, J. Robertson. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*, 61 (20), 14095–14107, 2000. doi:10.1103/PhysRevB.61.14095.
- [287] S. Praver, R. J. Nemanich. Raman spectroscopy of diamond and doped diamond. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 362 (1824), 2537–2565, 2004. doi:10.1098/rsta.2004.1451.
- [288] J. Wagner, C. Wild, W. Mueller-Sebert, P. Koidl. Infrared Raman study of the phonon linewidth and the nondiamond carbon phase in 110 and 100 textured polycrystalline

- diamond films. *Applied Physics Letters*, 61 (11), 1284, 1992. doi:10.1063/1.107566.
- [289] R. Pfeiffer, H. Kuzmany, N. Salk, B. Guenther. Evidence for trans-polyacetylene in nanocrystalline diamond films from H–D isotropic substitution experiments. *Applied Physics Letters*, 82 (23), 4149–4150, 2003. doi:10.1063/1.1582352.
- [290] N. G. Ferreira, E. Abramof, N. F. Leite, E. J. Corat, V. J. Trava-Airoldi. Analysis of residual stress in diamond films by x-ray diffraction and micro-Raman spectroscopy. *Journal of Applied Physics*, 91 (4), 2466, 2002. doi:10.1063/1.1431431.
- [291] F. Pedrotti, L. Pedrotti, W. Bausch, H. Schmidt. *Optik für Ingenieure*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 4. Edition, 2008.
- [292] M. Liao, M. Imura, X. Fang, K. Nakajima, G. Chen, Y. Koide. Integration of Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48}O₃) on single crystal diamond as metal-ferroelectric-insulator-semiconductor capacitor. *Applied Physics Letters*, 94 (24), 242901, 2009. doi:10.1063/1.3156030.
- [293] V. Zuerbig, M. Baeumler, J. Fries, T. Yoshikawa, D. Iankov, W. Pletschen, M. Liao, Y. Koide, S. Cherneva, R. Iankov, M. Datcheva, D. Stoychev, C. E. Nebel, O. Ambacher, V. Lebedev. PZT/NCD unimorph structures for tunable micro-optical devices. *in Vorbereitung*, 2016.

Abkürzungsverzeichnis

A	Fläche
a_j	Koeffizient einer Zernike-Entwicklung
AdaScan	Adaptives Scannendes Einzelfacettenauge, Projekt im DFG-Schwerpunktprogramm 1337 'Aktive Mikrooptik'
AFM	Rasterkraftmikroskop, engl.: <i>atomic force microscope</i>
AlN	Aluminiumnitrid
α	thermischer Ausdehnungskoeffizient
B-NCD	Bor-dotierter nanokristalliner Diamant
β	Neigungswinkel einer Wellenfront
C	Steifigkeitsmatrix
C_{ij}	elastische Koeffizienten
CH ₄	Methan
CMOS	engl.: <i>complementary metal-oxide semiconductor</i>
CVD	chemische Gasphasenabscheidung, engl.: <i>chemical vapour deposition</i>
D	Apertur/Öffnungsweite
d	Dicke/Schichtdicke
d_{33}/d_{31}	Piezoelektrischer Koeffizient
d_{di}	Dicke eines Dielektrikums
d_{in}	piezoelektrische Konstanten mit $i = 1 - 3$ und $n = 1 - 6$
d_{LC}	Zellabstand einer Flüssigkristalllinse
d_L	Durchmesser einer Linse
d_M	Membrandicke
d_m	Abstand zwischen magnetischen Momenten
Δn	Brechungsindexdifferenz
Δp	Änderung des Druckes

Δs	Verschiebung des Fokuspunktes auf dem Shack-Hartmann-Sensor
ΔT	Temperaturänderung
ΔV	Volumenänderung
δ	Auslenkung eines Biegebalkens
DMSO	Dimethylsulfoxid
DRIE	reaktives Ionentiefenätzen, engl.: <i>deep reactive ion etching</i>
E	Elastizitätsmodul, engl.: <i>Young's modulus</i>
E_3	elektrisches Feld
$E_{A,0}$	Ionisierungsenergie des Dotierstoffs
$E_{A,B}$	Aktivierungsenergie von Bor
$E_{A,P}$	Aktivierungsenergie von Phosphor
E_A	Aktivierungsenergie
ϵ	Permittivität, dielektrische Funktion
ε	Dehnung
$\vec{\varepsilon}$	Dehnungsvektor
F	Kraft
f	Brennweite
f_0	Anfangsbrennweite einer Mikrolinse
f_D	Dopplerfrequenz
f_{end}	Endbrennweite einer Mikrolinse
f_g	Brennweite einer konkaven Glaslinse
f_{LC}	Brennweite einer Flüssigkristallschicht
FEM	Methode der finiten Elemente, engl.: <i>Finite Element Method</i>
FWHM	Halbwertsbreite, engl.: <i>full width at half maximum</i>
γ	Scherung
H	Härte
h	Auslenkung einer Linse
h_i	Eindringtiefe eines Nanoindenters
HCl	Salzsäure

I	Intensität
ICP	induktiv gekoppeltes Plasma, engl.: <i>inductively coupled plasma</i>
In ₂ O ₃	Indiumoxid
ITO	Indiumzinnoxid
k	Boltzmann-Konstante, $k = 1.380\,658 \times 10^{-23}$ J/K
κ	spezifische Leitfähigkeit
l	Länge eines Biegebalkens
LC	Flüssigkristall, engl.: <i>liquid crystal</i>
LDV	Laser-Doppler-Vibrometrie
LED	Leuchtdiode, engl.: <i>light-emitting diode</i>
M	Modulation oder Kontrast
m	magnetisches Moment
MEMS	Mikro-elektro-mechanische Systeme
MOEMS	Mikro-opto-elektro-mechanische Systeme
MPECVD	Mikrowellen-Plasma-unterstützte chemische Gasphasenabscheidung, engl.: <i>microwave plasma enhanced chemical vapour deposition</i>
MTF	Modulations-Übertragungsfunktion, engl.: <i>modulation transfer function</i>
μ	Permeabilität
n	Brechungsindex
N _A	Dotierstoffkonzentration
N _B	Borkonzentration
N _d	Nukleationsdichte
n _{eff}	effektiver Brechungsindex
n _g	Brechungsindex einer konkaven Glaslinse
NA	Numerische Apertur
NCD	Nanokristalliner Diamant, engl.: <i>nanocrystalline diamond</i>
NH ₄ OH	Ammoniumhydroxid
NP	Nanokristalline Diamantpartikel
ν	Poissonzahl

P	Last
p	Druck
P_i	induzierte Polarisierung
P_{SP}	spontane Polarisierung
PDMS	Polydimethylsiloxan
PECVD	Plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung, engl.: <i>plasma-enhanced chemical vapour deposition</i>
PMMA	Polymethylmethacrylat
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
R	Krümmungsradius
r	Linsenradius
r_M	optische Pfadlänge des Messstrahls
r_R	optische Pfadlänge des Referenzstrahls
REM	Rasterelektronenmikroskop
RF	Hochfrequenz, engl.: <i>radio frequency</i>
ρ	Dichte
RIE	reaktives Ionenätzen, engl.: <i>reactive ion etching</i>
RMS	quadratisches Mittel, engl. <i>root mean square</i>
RT	Raumtemperatur
S	Kontaktsteifigkeit
S_{ij}	elastische Konstanten, engl.: <i>compliance</i>
SF ₆	Schwefelhexafluorid
SHS	Shack-Hartmann-Sensor
Si	Silizium
Si _x N _y	Siliziumnitrid
σ	Spannung
σ_0	Schichtspannung
σ_{lv}	Oberflächenspannung der Flüssigkeit
$\vec{\sigma}$	Spannungsvektor

σ_i	intrinsische Spannung
σ_{th}	thermische Spannung
SiO ₂	Siliziumdioxid
T	Temperatur
t	Reaktionszeit
τ	Schubspannung
TEM	Transmissionselektronenmikroskop
Θ	Winkel
TMB	Trimethylboran
TPA	trans-Polyacetylen
U	Anregungsspannung
U _{th}	Schwellspannung
V	Volumen
v	Flussrate
v(t)	Geschwindigkeit des Messobjektes
VRH	engl.: <i>variable range hopping</i>
WLI	Weißlichtinterferometer
x _D	laterale Verschiebung der Membranauslenkung
XRD	Röntgendiffraktometrie, engl.: <i>X-Ray diffraction</i>
z	Auslenkung einer Membran
Z _n ^m	Zernike-Polynom mit radialer Ordnung <i>n</i> und azimuthaler Frequenz <i>m</i>

A Anhang

A.1 Prozessschritte zur Herstellung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinse

In Tabelle A.1 sind die einzelnen Prozessschritte zur Herstellung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen dargestellt.

Tabelle A.1: Ablaufplan zur Herstellung der $\text{AlN}/\text{Si}_x\text{N}_y$ -Mikrolinsen. Hierbei bezeichnet die Ebene 1 die Mesa-Ätzung, die Ebene 2 die Kontaktmetallisierung, die Ebene 3 die Strukturierung der oberen Elektrode und die Ebene 4 die Membranherstellung.

Ebene	Prozessschritt	Bemerkung
1	Lithographie	Positivlack AZ 5214
1	500 nm Si_xN_y ätzen mit SF_6	ICP-Ätzanlage Oxford
1	Ablacken	DMSO
1	50 nm ITO nasschemisch ätzen	$\text{HCl}/\text{H}_2\text{O} = 1:1$
1	500 nm AlN nasschemisch ätzen	$\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:10, \approx 50^\circ\text{C}$
2	Lithographie	Negativlack AZ 5214
2	500 nm Si_xN_y ätzen mit SF_6	ICP-Ätzanlage Oxford
2	Ni/Pt/Au aufdampfen	50/150/200 nm
2	Liften	DMSO
3	Lithographie	Positivlack AZ 5214
3	500 nm Si_xN_y ätzen mit SF_6	ICP-Ätzanlage Oxford
3	50 nm ITO nasschemisch ätzen	$\text{HCl}/\text{H}_2\text{O} = 1:1$
3	Ablacken	DMSO
4	Schutzlack	Frontseite
4	Lithographie	Positivlack AZ 9260
4	Si ätzen mit SF_6	ICP-Ätzanlage STS
4	Ablacken	DMSO

A.2 Prozessschritte zur Herstellung der AIN/NCD-Mikrolinse

In Tabelle A.2 sind die einzelnen Prozessschritte zur Herstellung der AIN/NCD-Mikrolinsen aufgeführt.

Tabelle A.2: Ablaufplan zur Herstellung der AIN/NCD-Mikrolinsen. Hierbei bezeichnet die Ebene 1 die Mesa-Ätzung, die Ebene 2 die Kontaktmetallisierung, die Ebene 3 die Strukturierung der oberen Elektrode und die Ebene 4 die Membranherstellung.

Ebene	Prozessschritt	Bemerkung
1	Lithographie	Positivlack AZ 5214
1	200 nm Si_xN_y ätzen mit SF_6	ICP-Ätzanlage Oxford
1	Ablacken	DMSO
1	150 nm B-NCD ätzen mit O_2 -Plasma	ICP-Ätzanlage Sentech
1	150 nm NCD ätzen mit O_2 -Plasma	ICP-Ätzanlage Sentech
1	300 nm AIN nasschemisch ätzen	$\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O} = 1:10, \approx 50^\circ\text{C}$
2	Lithographie	Negativlack AZ 5214
2	200 nm Si_xN_y ätzen mit SF_6	ICP-Ätzanlage Oxford
2	Ni/Pt/Au aufdampfen	50/150/200 nm
2	Liften	DMSO
3	Lithographie	Positivlack AZ 5214
3	200 nm Si_xN_y ätzen mit SF_6	ICP-Ätzanlage Oxford
3	Ablacken	DMSO
3	150 nm B-NCD ätzen mit O_2 -Plasma	ICP-Ätzanlage Sentech
4	Schutzlack	Frontseite
4	Lithographie	Positivlack AZ 9260
4	Si ätzen mit SF_6	ICP-Ätzanlage STS
4	Ablacken	DMSO

A.3 Zernike-Polynome

Polare Darstellung

In Tabelle A.3 sind die Zernike-Polynome bis zur 4. Ordnung in ihrer polaren Schreibweise dargestellt mit ρ dem normierten radialen Abstand und θ dem azimutalen Winkel.

Tabelle A.3: Beschreibung und polare Darstellung der Zernike-Polynome bis zur 4. Ordnung. Dabei entspricht der tiefgestellte Index n der radialen Ordnung und der hochgestellte Index m der meridionalen Frequenz.

Z_n^m	Mode	polare Darstellung, $\Phi(\rho, \theta) =$	Beschreibung
Z_0^0	0	1	Kolben
Z_1^{-1}	1	$\rho \sin(\theta)$	horizontale Verkippung in y-Richtung
Z_1^1	2	$\rho \cos(\theta)$	vertikale Verkippung in x-Richtung
Z_2^{-2}	3	$\rho^2 \sin(2\theta)$	Astigmatismus 1. Ordnung, $45^\circ/130^\circ$
Z_2^0	4	$2\rho^2 - 1$	Defokus
Z_2^2	5	$\rho^2 \cos(2\theta)$	Astigmatismus 1. Ordnung, $0^\circ/90^\circ$
Z_3^{-3}	6	$\rho^3 \sin(3\theta)$	3-strahliger Astigmatismus (Trefoil) in y-Richtung
Z_3^{-1}	7	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin(\theta)$	Koma 1. Ordnung in y-Richtung
Z_3^1	8	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos(\theta)$	Koma 1. Ordnung in x-Richtung
Z_3^3	9	$\rho^3 \cos(3\theta)$	3-strahliger Astigmatismus (Trefoil) in x-Richtung
Z_4^{-4}	10	$\rho^4 \sin(4\theta)$	4-strahliger Astigmatismus (Quadrafoil) in y-Richtung
Z_4^{-2}	11	$(4\rho^4 - 3\rho^2) \sin(2\theta)$	sekundärer Astigmatismus in y-Richtung
Z_4^0	12	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	sphärische Aberration
Z_4^2	13	$(4\rho^4 - 3\rho^2) \cos(2\theta)$	sekundärer Astigmatismus in x-Richtung
Z_4^4	14	$\rho^4 \cos(4\theta)$	4-strahliger Astigmatismus (Quadrafoil) in x-Richtung

Graphische Darstellung

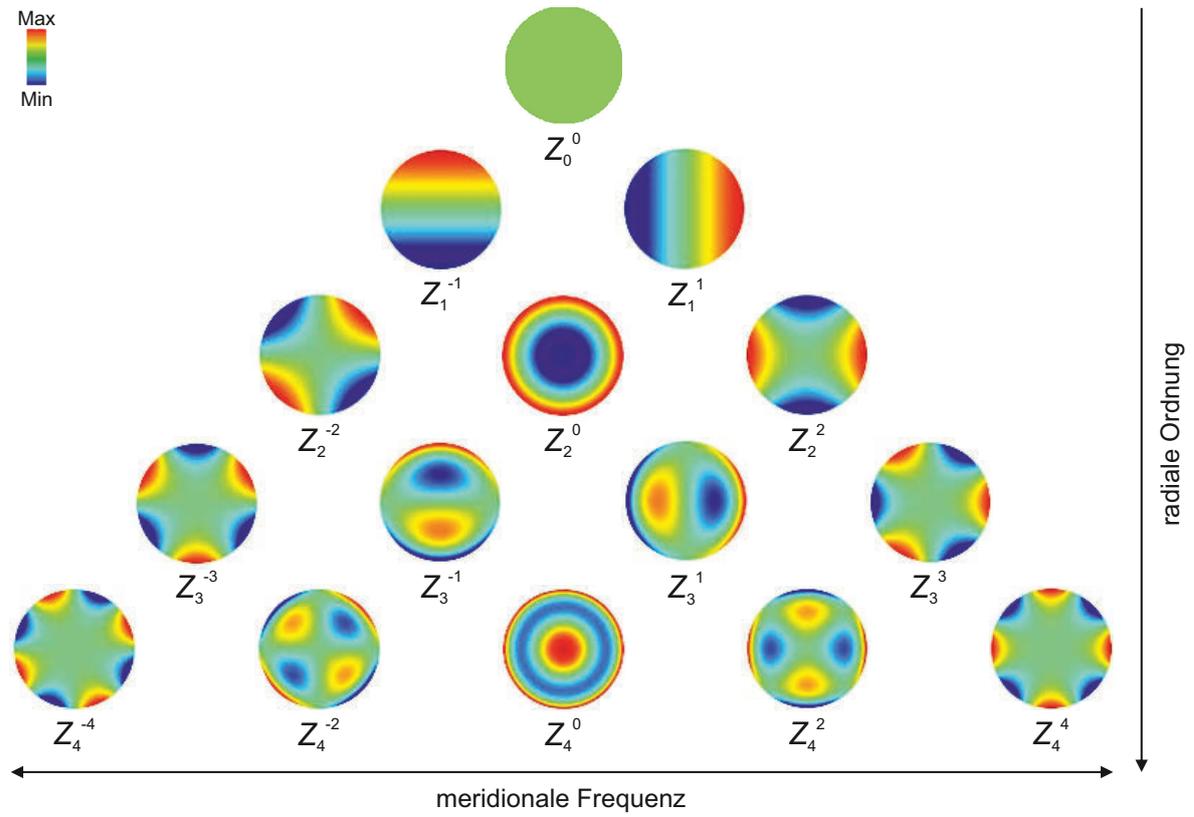


Abbildung A.1: Graphische Darstellung der Zernike-Polynome als Pyramide bis zur 4. Ordnung

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während der Promotion begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank geht an:

- Prof. Dr. Oliver Ambacher für die Möglichkeit diese Arbeit am Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF durchzuführen, für die allzeit vorhandene Hilfsbereitschaft und für die Betreuung dieser Arbeit.
- Prof. Dr. Stefan Sinzinger für die Übernahme der Zweitbegutachtung.
- Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein und Prof. Dr. Karsten Buse als weitere Mitglieder in meiner Prüfungskommission.
- Dr. Vadim Lebedev für die fachliche Betreuung dieser Arbeit. Ganz besonders bedanken möchte ich mich für die ständige Hilfsbereitschaft bei allen Fragen und Problemen.
- Dr. Christoph Nebel für die stete Gesprächsbereitschaft bei allen Fragen rund um das Diamantwachstum.
- Dr. Volker Cimalla für das Korrekturlesen der Arbeit und für die Unterstützung während der Promotion insbesondere für die langen und wertvollen Diskussionen.
- Dr. Wilfried Pletschen für die Unterstützung bei der Realisierung der Bauelemente, für die anregenden und hilfreichen Diskussionen und für die Möglichkeit an seinem Wissen teilhaben zu dürfen.
- Dr. Katarzyna Holc für die Unterstützung bei der Realisierung der Bauelemente und für die REM-Messungen.
- Markus Reusch für die Herstellung der AIN-Schichten.
- die Kollegen der Abteilung Technologie insbesondere Oliver Göhlich, René Lappe und Frank Bernhardt.
- Dr. Lutz Kirste und Mario Prescher für die zahlreichen Röntgenmessungen.
- Martin Grimm und Theo Fuchs für die SIMS-Messungen.
- Dr. Martina Baeumler für die Durchführung der spektroskopischen Ellipsometriemessungen an PZT-Dünnschichten.
- Dr. Jan Jakob Hees für die Einführung in das Diamantwachstum.
- meine Bachelor- und Masterstudenten Lucas Pinti und Johannes Fries.

- Julia Roeder für die Unterstützung während meiner Promotion.
- Daniel Pätz von der Technischen Universität Ilmenau für die optischen Simulationen mit ZEMAX und für die Unterstützung bei den Wellenfrontmessungen mit dem Shack-Hartmann-Sensor.
- Mohamed Bichra von der Technischen Universität Ilmenau für die Unterstützung bei den Wellenfrontmessungen mit dem Shack-Hartmann-Sensor.
- Steffen Leopold von der Technischen Universität Ilmenau für die Herstellung einiger AlN-Schichten.
- Henry Romanus von der Technischen Universität Ilmenau und die Kollegen am Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM in Halle für die TEM-Messungen.
- Dr. Marie-Luise Bauersfeld, Susanne Drost und Olivia Herms vom Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM in Freiburg für die PZT-Ätzungen.
- Dr. Yasuo Koide und Dr. Meiyong Liao für die Betreuung und die Zusammenarbeit während meines Forschungsaufenthaltes am National Institute for Materials Science (NIMS) in Tsukuba, Japan.
- die Mitarbeiter der Wide Bandgap Materials Group am National Institute for Materials Science (NIMS) in Tsukuba für ihre freundliche Unterstützung während meines Forschungsaufenthaltes in Japan.
- Taro Yoshikawa, Dimitre Iankov, Dr. Roumen Iankov und Dr. Maria Datcheva für die Durchführung der Nanoindentierungs-Messungen am Institute of Mechanics in Sofia, Bulgarien.
- alle Kollegen der Abteilung Halbleitersensorik für das angenehme und kooperative Arbeitsklima.
- Dr. Lutz Klapp für die Unterstützung bei der Latex-Formatierung.
- Dr. Ulrich Kristen für das Korrekturlesen der Arbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt auch meiner Schwester Anna und meinen Eltern Petra und Dr. Jürgen Züribig (der leider das Ende meiner Promotion nicht mehr miterleben kann) für die Unterstützung und Hilfsbereitschaft während meiner Promotion.

Publikationen

Buchkapitel

Pätz, D., Leopold, S., **Zuerbig, V.**, Knöbber, F., Ambacher, O., Hoffmann, M., Lebedev, V., Sinzinger, S.

Aluminum nitride and diamond membranes for tunable micro-optics

Chapter 9 in Tunable Micro-optics, 2015, Edited by Hans Zappe and Claudia Duppé, Cambridge University Press, ISBN: 1107032458, p. 219

Pätz, D., Sinzinger, S., Leopold, S., Hoffmann, M., **Zuerbig, V.**, Ambacher, O., Lebedev, V., Deutschmann, T., Oesterschulze, E.

Adaptive scanning micro-eye

Chapter 15 in Tunable Micro-optics, 2015, Edited by Hans Zappe and Claudia Duppé, Cambridge University Press, ISBN: 1107032458, p. 369

Fachzeitschriften

Zuerbig, V., Bugaew, N. Reithmaier, J. P., Kozub, M., Musiał, A., Sęk, G., Misiewicz, J. *Growth-temperature dependence on wetting layer formation in high density InGaAs/GaAs quantum dot structures grown by droplet epitaxy*

Japanese Journal of Applied Physics 2012, 51, p. 085501

Benyoucef, M., **Zuerbig, V.**, Reithmaier, J. P., Kroh, T., Schell, W., Aichele, T., Benson, O.

Single-photon-emission from single InGaAs/GaAs quantum dots grown by droplet epitaxy at high substrate temperature

Nanoscale Research Letters 2012, 7, p. 493

Knöbber, F., **Zuerbig, V.**, Heidrich, N., Hees, J., Sah, R. E., Baeumler, M., Leopold, S., Pätz, D., Ambacher, O., Lebedev, V.

Static and dynamic characterization of AlN and nanocrystalline diamond membranes

Physica Status Solidi (a) 2012, 209, p. 1835 (Editor's choice)

Zuerbig, V., Pletschen, W., Hees, J., Sah, R. E., Kirste, L., Heidrich, N., Nebel, C. E., Ambacher, O. Lebedev, V.

Transparent diamond electrodes for tunable micro-optical devices

Diamond and Related Materials 2013, 38, p. 101

Heidrich, N., **Zuerbig, V.**, Iankov, D., Pletschen, W., Sah, R. E., Raynor, B., Kirste, L., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Piezoelectrically actuated diamond cantilevers for high-frequency applications

Diamond and Related Materials 2013, 38, p. 69

Heidrich, N., Iankov, D., Hees, J., Pletschen, W., Sah, R. E., Kirste, L., **Zuerbig, V.**, Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Enhanced mechanical performance of AlN/nanodiamond micro-resonators

Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23, p. 125017

Lebedev, V., Iankov, D., Heidrich, N., **Zuerbig, V.**, Wild, C., Cimalla, V., Ambacher, O.

Nano-diamond based spheres for radio frequency electromechanical resonators

Journal of Micromechanics and Microengineering, 2014, 24, p. 045015

Zuerbig, V., Hees, J., Pletschen, W., Sah, R. E., Wolfer, M., Kirste, L., Heidrich, N., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Elastic properties of ultrathin diamond/AlN membranes

Thin Solid Films, 2014, 558, p. 267

Yoshikawa, T., **Zuerbig, V.**, Gao, F., Hoffmann, R., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Appropriate salt concentration of nanodiamond colloids for electrostatic self-assembly seeding of mono-sized individual diamond nanoparticles on silicon dioxide surfaces

Langmuir, 2015, 31, p. 5319

Yoshikawa, T., Gao, F., **Zuerbig, V.**, Giese, C., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Pinhole-free ultrathin nanocrystalline diamond film growth via electrostatic self-assembly seeding with increased salt concentration of nanodiamond colloids

Diamond and Related Materials, 2016, 63, p. 103

Yoshikawa, T., Reusch, M., Holc, K., Iankov, D., **Zuerbig, V.**, Zukauskaitė, A., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Piezoelectric actuation of nanocrystalline diamond microelectromechanical disk resonators

Applied Physics Letters, 2016, 108, p. 171903

Yoshikawa, T., Reusch, M., **Zuerbig, V.**, Cimalla, V., Lee, K.-H., Kurzyp, M., Arnault, J.-C., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Electrostatic self-assembly of diamond nanoparticles onto Al- and N-polar sputtered aluminum nitride surfaces

Nanomaterials, 2016, 6, p. 217

Konferenzbeiträge

Zuerbig, V., Paetz, D., Pletschen, W., Hees, J., Sah, R. E., Kirste, L., Heidrich, N., Cimalla, V., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Piezo-actuated tunable diamond/AlN micro lenses

IEEE Transducers & Eurosensors 2013, p. 2317

Heidrich, N., Hees, J., **Zuerbig, V.**, Iankov, D., Pletschen, W., Sah, R. E., Raynor, B., Kirste, L., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Nano-diamond vacuum MEMS for RF applications

IEEE Transducers & Eurosensors 2013, p. 218

Iankov, D., **Zuerbig, V.**, Pletschen, W., Giese, C., Ianucci, R., Ambacher, O., Lebedev, V.
Processing of nanoscale gaps for boron-doped nycocrystalline diamond based MEMS
Procedia Engineering, 2014, 87, p. 903

Zuerbig, V., Paetz, D., Fries, J., Pletschen, W., Holc, K., Reusch, M., Nebel, C. E.,
Sinzinger, S., Ambacher, O., Lebedev, V.
Tunable multisegment Si_xN_y /AlN piezo lenses for wavefront correction
IEEE Transducers, 2015, p. 2045

Reusch, M., Katus, P., Pletschen, W., Holc, K., Kirste, L., **Zuerbig, V.**, Iankov, D.,
Reindl, L., Ambacher, O., Lebedev, V.
*Aluminium Nitride Membranes with Embedded Buried IDT Electrodes for Novel Flexural
Plate Wave Devices*
IEEE Transducers, 2015, p. 1291

Vorträge

Kozub, M., Musiał, A., Sęk, G., Misiewicz, J., **Zuerbig, V.**, Reithmaier J. P.
*Optical properties of InGaAs Quantum Dots on (100) GaAs Substrates Formed by Droplet
Epitaxy*
41st "Jaszowiec" International School & Conference on the Physics of Semiconductors,
Krynica-Zdrój, Polen, 8.-15. Juni 2012

Benyoucef, M., **Zuerbig, V.**, Reithmaier, J. P., Schnell, A., Aichele, T., Benson, O.
*Single-photon emission from single InGaAs/GaAs quantum dots grown by droplet epitaxy
at high substrate temperature*
International Conference on Superlattices, Nanostructures, and Nanodevices (ICSNN),
Dresden, 22.-27. Juli 2012

Zuerbig, V., Knoebber, F., Hees, J., Sah, R. E., Pletschen, W., Heidrich, N., Leopold,
S., Paetz, D., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.
Ultrathin Diamond/AlN membranes for tunable micro-opto-electro-mechanical systems
International Conference on Diamond and Carbon Materials, Granada, Spanien, 2.-6.
September 2012

Lebedev, V., Heidrich, N., Hees, J., **Zuerbig, V.**, Knoebber, F., Sah, R. E., Pletschen,
W., Raynor, B., Cimalla, V., Nebel, C. E., Ambacher, O.
AlN/Diamond coupled resonator system for radio-frequency electronic applications
International Conference on Diamond and Carbon Materials, Granada, Spanien, 2.-6.
September 2012

Zuerbig, V., Pletschen, W., Hees, J., Sah, R. E., Heidrich, N., Nebel, C. E., Ambacher,
O., Lebedev, V.
Tunable diamond/AlN micro-optical devices
New Diamond and Nano Carbons Conference (NDNC), Singapur, 19.-23. Mai 2013

Heidrich, N., Hees, J., **Zuerbig, V.**, Iankov, D., Pletschen, W., Sah, R. E., Raynor, B.,
Kirste, L., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.
Piezoelectrically actuated diamond cantilevers for high-frequency applications
New Diamond and Nano Carbons Conference (NDNC), Singapur, 19.-23. Mai 2013

- Zuerbig, V.**, Pletschen, W., Hees, J., Sah, R. E., Heidrich, N., Kirste, L., Paetz, D., Leopold, S., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.
Verstimmbare AlN/Diamant-Mikrolinsen für Mikro-Opto-Elektro-Mechanische Systeme
Mikrosystemtechnik-Kongress, Aachen, 14.-16. Oktober 2013
- Fries, J., **Zuerbig, V.**, Pletschen, W., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.
Multisegment-actuated micro-lenses based on ultrathin membranes
Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e.V., Dresden, 30. März - 4. April 2014
- Lebedev, V., Heidrich, N., Iankov, D., **Zuerbig, V.**, Wild, C., Nebel, C. E., Ambacher, O.
Nanodiamond spherical resonators for RF circuits
Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), Cannes, Frankreich, 1.-4. April 2014
- Zuerbig, V.**, Pletschen, W., Kirste, L., Heidrich, N., Iankov, D., Nebel, C. E., Ambacher, O., Liao, M., Koide, Y., Lebedev, V.
Tunable Microoptics from boron-doped diamond and AlN/PZT
MRS Spring Meeting, San Francisco, USA, 21.-25. April 2014
- Zuerbig, V.**, Fries, J., Pletschen, W., Reusch, M., Iankov, D., Nebel, C. E., Ambacher, O., Liao, M., Koide, Y., Lebedev, V.
Optical and mechanical investigations of diamond-membrane micro lenses
International Conference on Diamond and Carbon Materials, Madrid, Spanien, 7.-11. September 2014
- Yoshikawa, T., **Zuerbig, V.**, Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.
Formation of mono-sized diamond nanoparticles on silicon dioxide surfaces
New Diamond and Nano Carbons Conference (NDNC), Shizuoka, Japan, 24.-28. Mai 2015
- Lebedev, V., Iankov, D., Yoshikawa, T., Pletschen, W., **Zuerbig, V.**, Holc, K., Nebel, C. E., Ambacher, O.
Modulated field emission from nano-diamond nanostructured devices
New Diamond and Nano Carbons Conference (NDNC), Shizuoka, Japan, 24.-28. Mai 2015
- Iankov, D., **Zuerbig, V.**, Pletschen, W., Yoshikawa, T., Reusch, M., Holc, K., Iannucci, R., Giese, C., Ambacher, O., Lebedev, V.
Nanocrystalline diamond ultra-thin films on microstructured templates for MEMS applications
European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes (FEMS EUROMAT), Warschau, Polen, 20.-24. September 2015
- Yoshikawa, T., Gao, F., **Zuerbig, V.**, Nebel, C. E., Ambacher O., Lebedev, V.
Pinhole-free ultra-thin nanocrystalline diamond film growth via electrostatic self-assembly seeding with increased salt concentration of nanodiamond colloids
International Conference on Diamond and Carbon Materials, Bad Homburg, 6.-10. September 2015
- Zuerbig, V.**
Diamond-based tunable microlenses (eingeladener Vortrag)
EMN Summer Meeting, Cancun, Mexiko, 05.-09. Juni 2016

Poster

Zuerbig, V., Gushterov, A., Lingys, L., Benyoucef, M., Reithmaier, J. P.
Molecular beam epitaxy of InAs quantum dots on (100) GaAs substrate formed by droplet epitaxy at high substrate temperatures

International Conference on Molecular Beam Epitaxy, Berlin, 22.-27. August 2010

Zuerbig, V., Gushterov, A., Benyoucef, M., Reithmaier, J. P.
Droplet epitaxy of InGaAs quantum dots on (100) GaAs substrate

Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e.V., Dresden, 13.-18. März 2011

Heidrich, N., Pletschen, W., **Zuerbig, V.**, Iankov, D., Kirste, L., Raynor, B., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Nano-diamond vacuum MEMS for rf applications

Transducers 2013, 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Barcelona, Spanien, 16.-20. Juni 2013

Zuerbig, V., Pletschen, W., Hees, J., Sah, R. E., Heidrich, N., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Piezo-actuated tunable AlN/diamond micro lenses

Transducers 2013, 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Barcelona, Spanien, 16.-20. Juni 2013

Iankov, D., **Zuerbig, V.**, Pletschen, W., Giese, C., Ianucci, R., Ambacher, O., Lebedev, V.

Processing of nanoscale gaps for boron-doped nanocrystalline diamond based MEMS

Eurosensors, Brescia, Italien, 7.-10. September 2014

Zuerbig, V., Fries, J., Pletschen, W., Paetz, D., Holc, K., Reusch, M., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Tunable multisegment Si_xN_y/AlN piezo lenses for wavefront correction

Transducers 2015, 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Alaska, USA, 21.-25. Juni 2015

Reusch, M., Katus, P., Pletschen, W., Holc, K., Kirste, L., **Zuerbig, V.**, Iankov, D., Reindl, L., Ambacher, O., Lebedev, V.

Aluminium Nitride Membranes with Embedded Buried IDT Electrodes for Flexural Plate Wave Devices

Transducers 2015, 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Alaska, USA, 21.-25. Juni 2015

Yoshikawa, T., **Zuerbig, V.**, Cimalla, V., Reusch, M., Lee, K.-H., Kurzyk, M., Arnault, J.-C., Nebel, C. E., Ambacher, O., Lebedev, V.

Nanodiamond seeding on different polarities of aluminum nitride

Hasselt Diamond Workshop 2016 SBD XXI, Hasselt, Belgien, 09.-11.03.2016

Herausgeber: Prof. Dr. Oliver Ambacher

In den letzten Jahren steigt der Bedarf an kompakten optischen Systemen. Einen großen Forschungsbereich stellt hierbei die aktive Mikrooptik dar. Aktive mikrooptische Systeme ermöglichen es die optischen Eigenschaften der Mikrosysteme gezielt während des Betriebs anzupassen und eröffnen somit neue Möglichkeiten im optischen Systemdesign. Die aktiven mikrooptischen Systeme können in Smartphones, Endoskopiekameras, in der Prozesskontrolle, im Qualitätsmanagement sowie fürs Robotersehen eingesetzt werden.

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit der Entwicklung und Herstellung neuartiger, piezoelektrisch-aktuierter verstimmbarer Mikrolinsen. Dabei werden neue Materialkombinationen für die adaptive Mikrooptik erforscht und getestet. Als neuartige Materialsysteme werden elastische Siliziumnitrid- und nanokristalline Diamant-Membranen mit piezoaktivem Aluminiumnitrid kombiniert. Die Änderung der Oberflächenkrümmung der Mikrolinsen wird durch den unimorphen Aktuierungsmechanismus realisiert. Das neuartige Linsendesign ermöglicht eine kontrollierte symmetrische und asymmetrische Verformung der Linsenoberfläche und somit eine integrierte Fokus- und Wellenfrontkorrektur.

ISBN 978-3-8396-1132-6



9 783839 611326