Schlussbericht zu Nr. 3.2
Rahmenprogramm Mikrosysteme 2004 - 2009

Funktionale Mikrostrukturen für innovative Sensorkonzepte (INNOSENS)

Zuwendungsempfänger: Prof. O. Ambacher Förderkennzeichen: 16SV2281
Institut für Mikro- und Nanotechnologien
Technische Universität Ilmenau
Gustav-Kirchhoff-Str. 7, D-98693 Ilmenau

Vorhabensbezeichnung: **InnoSens**

Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2006 – 31.05.2007

Berichtszeitraum: 01.06.2006 – 31.05.2007

Bearbeiter:

A) MIKROSPEK
Prof. M. Hoffmann
Dr. A. Albrecht
Dipl.-Ing. T. Polster
Dipl.-Ing. K. Tonisch
Dipl.-Ing. M. Ali

B) PHOTOFLUIDIK
Prof. S. Sinzinger
Dr. T. Gramsch
Dipl.-Ing. M. Amberg
Dipl.-Ing. D. Claus
Dipl.-Ing. S. Stoebenau
Dipl.-Ing. R. Horn

C) BIOFACE
Dr. A. Schober
Dr. S. Mrotzek
Dipl.-Ing. K. Lilienthal

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Das Projekt InnoSens ordnete sich thematisch in das Rahmenprogramm Mikrosystemtechnik 2004-2009 ein. Durch grundlegende Untersuchungen zu funktionalen Mikrostrukturen für innovative Sensorkonzepte wurde die interdisziplinäre Kompetenz am Wissenschaftsstandort Ilmenau gestärkt, die Wettbewerbsfähigkeit nicht nur im nationalen sondern auch im internationalen Maßstab durch Innovationen aktiv gesichert und damit ein Beitrag zur Konsolidierung der Beschäftigungssituation geleistet. Insbesondere die Bereiche Mikromechanische Systeme, Nano-Mikro-Integration sowie Mikrofluidik wurden in diesem Forschungsprojekt durch die breite Forschungsbasis mit drei Forschungsschwerpunkten abgebildet. Die notwendige und zukunftsweisende Verbindung der Materialwissenschaften und der Mikrosystemtechnik mit den Lebenswissenschaften manifestiert sich durch die Umsetzung von biologischen Prinzipien auf verschiedenen Materialsystemen, z.B. Silicium, Glas und keramische Halbleitermaterialien, als Basis für die Gewinnung und Verarbeitung von Informationen sowie ihrer aktorischen Umsetzung.

Der Systemgedanke spielt dabei eine zunehmend wichtigere Rolle in der nachhaltigen Entwicklung. Das bionische Konzept der akustischen mikromechanischen Spektrum-Analysatoren reflektiert ebenso auf diesen Ansatz, wie die Integration von optischen Werkzeugen zur Partikelmanipulation durch fokussiertes Licht. Funktionale ionensensitive Schichten schlagen die Brücke neuartiger Sensorsysteme auf AlGaN/GaN-Basis zu biologischen Anwendungen.

Die drei gebildeten Projektschwerpunkte adressierten funktionale Mikrostrukturen mit einer Schlüsselstellung für innovative Sensorkonzepte. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die folgenden Schwerpunkte:

A) funktionale piezoelektrische Membranen aus Aluminiumnitrid für mikromechanische Akustische Spektrum-Analysatoren (**MIKROSPEK**),

B) dynamische photonische Kanäle zum Zell-Handling in mikrofluidischen Systemen (**PHOTOFLUID**) sowie

C) spin-on-glas als ionenselektive Schicht für AlGaN/GaN-basierende Sensoren (**BIOFACE**).

Im Rahmen des Projektes wurden grundlegende Fragen der Eigenschaften, der Modellierung und der technologischen Realisierung beantwortet und Demonstratoren aufgebaut um die Grundlage für weiterführende BMBF-Projekte mit industriellen Partnern zu schaffen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

A) MIKROSPEK

Das Vorhaben wurde am Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien der Technischen Universität Ilmenau durchgeführt, das über eine sehr gute Ausstattung an Prozess- und Analyseequipment verfügt. Im Projektteil A) MIKROSPEK wurde speziell eine Reaktivsputteranlage vom Typ Nordiko für die Untersuchungen zur AlN-Dünnschichtherstellung in Betrieb genommen und genutzt. Für die Entwicklung der Technologiekonzepte kam der gesamte Anlagenkomplex für die Lithografie, die Dünnschichtherstellung und die Plasmatiefenstrukturierung sowie die Fein-

strukturanalytik zum Einsatz. Außerdem konnte auf weitgreifende Erfahrungen auf dem Gebiet der Gruppe-III-Nitride und auf Expertise zur Deposition von piezoelektrischen Schichten zurückgegriffen werden. Zu Beginn der Bearbeitung musste der Prozess zur Herstellung von Aluminiumnitird (AlN) in einer reaktiven Sputteranlage mit HF Anregung etabliert werden. Es standen durch die Erfahrungen mit dem Material AlN Referenzprozesse auf Hochtemperaturanlagen zur Verfügung, die eine Bewertung der Leistungsfähigkeit des neu einzufahrenden Prozesses möglich machten.

B) PHOTOFLUID

Die Arbeiten im Teilprojekt B) PHOTOFLUID bauen auf langjährigen Erfahrungen im Fachgebiet Technische Optik auf den Gebieten der Mikrooptik und der klassischen Technischen Optik auf. In Verbindung mit den hervorragenden technologischen Möglichkeiten des „Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien (ZMN)“ wurden neue Ansätze zur Integration optischer und fluidischer Systeme zu mikro-opto-fluidischen Systemen entwickelt und experimentell demonstriert. Unterstützt durch Erfahrungen aus vorausgegangenen Projekten zur Entwicklung mikrooptischer Bauelemente für optische Pinzetten mit internationalen Partnern wurde ein leistungsfähiger Aufbau zur Untersuchung optischer Mikromanipulation (optische Pinzette) entwickelt. Damit wurden die experimentellen Möglichkeiten an der TU Ilmenau insbesondere für Forschungsarbeiten zahlreicher weiterer Fachgebiete und Nachwuchsgruppen auf dem Gebiet der Mikrofluidik, Biosensorik und Mikroreaktionstechnik deutlich gestärkt. Die Voraussetzungen im Fachgebiet Technische Optik für die Arbeit mit einer optischen Pinzette mussten erst geschaffen werden. Durch die Zusammenarbeit in einem Partner aus Schweden konnten im Vorfeld zu diesem Projekt erste Erfahrung gesammelt werden. Neben geschaffenen räumlichen Kapazitäten war es möglich, die Arbeiten im Projekt mit Hilfe der bewilligten Mittel gut durchzuführen.

C) BIOFACE

Das Teilprojekt wurde ebenfalls am Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien durchgeführt, das über eine sehr gute Ausstattung an Prozess- und Analysemethoden verfügt. Für den Projektteil C) BIOFACE wurde im Vorfeld des Projekts ein Spin-Coater in die Photolithographiestrecke integriert um dünne Glasschichten durch Schleuderprozesse auf Sensoroberflächen zu deren Funktionalisierung aufbringen zu können. Auch wurden Vorarbeiten zur Strukturierung von isolierenden Mikroschichten mit Hilfe der Photolithographie durchgeführt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

In keinem der drei Teilprojekte traten in der Projektlaufzeit wesentliche Verschiebungen im Vergleich zum ursprünglich geplanten Arbeits-, Zeit- und Kostenplan auf.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

A) MIKROSPEK

Um den Anforderungen an ein akustisches Sensorelement (frequenzauflösendes Mikrofon) gerecht zu werden, sind hochsensible schwingungsfähige Strukturen eine zwingende Voraussetzung. Um diese sensiblen Strukturen zu realisieren sind freitragende dünne Membranen eine Lösung. Nach bisherigem Stand der Technik werden in nur wenigen Veröffentlichungen schwingenden Membranen ohne zusätzlichen „support layer“ dokumentiert. Es existieren nur vereinzelt Ansätze, ein piezoelektrisches Mikrofon auf Basis einer freitragenden piezoelektrischen Membran herzustellen.

B) PHOTOFLUID

Die Möglichkeit zur optischen Manipulation von Mikropartikeln mit Hilfe sogenannter optischer Pinzetten oder optischer Fallen ist seit nahezu 20 Jahren bekannt und seit längerem Stand der Technik in der Biotechnolgie. Optische Pinzetten werden vorwiegend in invertierte Mikroskope eingebaut. Insbesondere im angloamerikanischen Raum beschäftigen sich seit Jahren wissenschaftliche Forschungsinstitute (1-4) mit dieser Thematik, wobei verstärkt auch der Einsatz mikrooptischer Bauelemente zur Strahlformung in modularen optischen Systemen diskutiert wird. In der deutschen Forschungslandschaft haben, neben der Anwendung in der Biomedizin, aufbautechnische und optische Aspekte erst in den vergangenen 2-3 Jahren Bedeutung gewonnen. Dies manifestiert sich z.B. auch auf den Jahrestagungen der „Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik“ die einen starken Zuwachs der Themen rund um die optische Manipulation von Mikroobjekten zu verzeichnen haben. Die im Zentrum des Teilprojektes PHOTOFLIUD stehenden Experimente greifen diese Arbeiten auf. Durch den starken Fokus, der auf die Integration in komplexe funktionelle mikrofluidische Systeme gelegt wurde, knüpfen sie unmittelbar an die Thematik „Optofluidik“ an, die, nahezu zeitgleich, in der amerikanischen Forschungslandschaft mit erheblichen Fördermitteln gestützt wurde und große Bedeutung erlangt hat (5).

(1) Homepage “Department of Physics” New York Universität http://physics.nyu.edu/~dg86/ (24.09.07).
(2) Homepage „Optical Trapping Group” St. Andrews Univeristät, Schottland http://www.st-andrews.ac.uk/~atomtrap/ (24.09.07)
(3) Homepage “Programmable Phase Optics Group” Risø National Laboratory, Dänemark http://www.ppo.dk/index.htm (24.09.07).
(4) D. Grier “A revolution in optical manipulation” *Nature* 424, S. 810-816 (2003).
(5) D. Psaltis, S.R. Quake, C. Yang “Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics” Nature 442, S. 381-386 (2006).

C) BIOFACE

Arbeiten zur Funktionalisierung von AlGaN/GaN-basierenden Flüssigkeitssensoren mit Hilfe von dünnen Glasschichten (spin on glas) sind nicht bekannt. Mit dem Teilprojekt BIOFACE wurde eine neue Möglichkeit der Oberflächenfunktionalisierung von Halbleitersensoren evaluiert.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

A) MIKROSPEK

Innerhalb der TU Ilmenau gab es eine Zusammenarbeit zwischen den Fachgebieten Nanotechnologien (NT) und Mikromechanische Systeme (MMS). Dabei konnte

auf das Wissen zum piezoelektrischen Verhalten von AlN, welches im Fachgebiet NT angesiedelt ist zurückgegriffen werden. Das Fachgebiet MMS stellte die Anlagentechnik zur Herstellung von piezoelektrischen AlN-Schichten zur Verfügung. Unterstützung in Fragen der elektrischen und piezoelektrischen Charakterisierung lieferte das Fachgebiet NT.
Mit dem Fraunhofer Institut für Elektronenstrahl- und Plasmatechnik (FEP) in Dresden wurde eine gemeinsame Untersuchung der von der Firma FEP DC gepulst gesputterten AlN-Schichten durchgeführt. Dazu wurden mit einer Hochratenanlage äußerst homogene AlN-Schichten gesputtert, die vom Fachgebiet MMS analysiert und klassifiziert wurden.
Am Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme (IMMS) in Ilmenau wurde eine Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von AlN-Membranen mittels eines Laservibrometers vorgenommen.

B) PHOTOFLUID

Das Teilprojekt PHOTOFLUID konnte nur durch zahlreiche interdisziplinäre Kooperationen innerhalb des „Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien“ der TU Ilmenau und mit nationalen und internationalen Partnern („Programmable Phase Optics Group“ Risø National Laboratory/Dänemark (J. Glückstad), „Optical Manipulation and Bioimaging“-Gruppe Göteborg Universität/Schweden (D. Hanstorp), „Fachgebiet Physik“ Universität Durham/England (G. Love) und „Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik (iba)“ Heiligenstadt (J. Metze)) erfolgreich bearbeitet werden. Durch die Präsentation der Forschungsergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen sind zahlreiche Kontakte entstanden und Ansätze für weiterführende Forschungsprojekte entwickelt worden. Auch innerhalb der Universität bieten die erzielten Ergebnisse sehr gute Vorraussetzungen für weiterführende Arbeiten im Bereich der Forschung aber auch im Technologietransfer in Zusammenarbeit mit regionalen mittelständischen Unternehmen.

C) BIOFACE

Im Rahmen des Teilprojekts BIOFACE wurde bei der Entwicklung der AlGaN/GaN Sensoren mit dem Walter Schottky Institut der TU München und mit der Firma Mettler Toledo (Zürich) kooperiert. Biologische Modelsysteme (Zellen, Biomoleküle) wurden mit Hilfe der Universität Karlsruhe evaluiert.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse, Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen

A) MIKROSPEK

Aufklärung des Zusammenhanges zwischen Abscheidbedingungen, Textur, piezoelektrischen Eigenschaften und mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Stress) von AlN-Dünnschichten zur Energie- und Signalwandlung

Zur Herstellung der AlN-Schichten auf 100 mm Siliciumsubstraten wurde eine Hochratensputteranlage mit HF Anregung eingesetzt. Es fanden Untersuchungen des Einflusses der Abscheidebedingungen auf die Textur (kristalline Schichteigenschaften) und die mechanischen Eigenschaften der Schichten statt. Zu Beginn der Untersuchungen stand eine systematische Untersuchung des Einflusses der Hauptparameter des Sputterprozesses auf die Eigenschaften des abgeschiedenen

AlN (kristalline Struktur, elektrische Eigenschaften und mechanischer Spannungszustand). Dazu wurden die vier Hauptbeschichtungsparameter variiert und der Einfluss dieser Variation auf die kristalline Schichtstruktur bestimmt. Dabei kamen Analysen mittels Röntgenbeugung zum Einsatz. Es stellte sich eine unterschiedlich stark orientierte polykristalline Struktur ein, die die für piezoelektrische Eigenschaften benötigte c-Achsenorientierung aufwies. In den Diagrammen Abb. 1 bis Abb. 4 wird als charakteristisches Maß für den Grad der gewünschten c-Achsenorientierung die Halbwertsbreite (HWB) des Röntgenreflexes (002) angeführt. Je schmaler die HWB wird, desto besser ist diese Orientierung ausgeprägt.

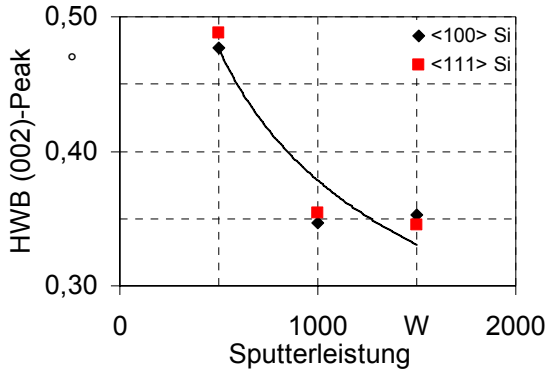


Abb. 1: Einfluss der Sputterleistung auf die kristalline Struktur der gesputterten AlN-Schicht

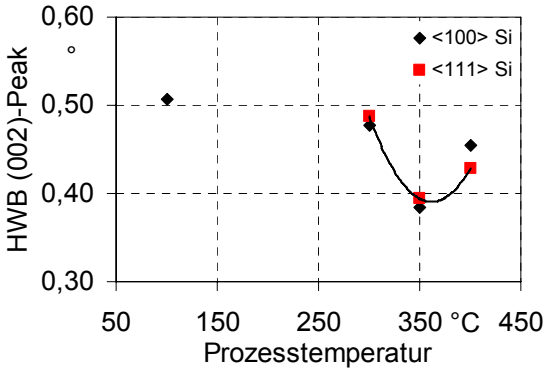


Abb. 2: Einfluss der Prozesstemperatur auf die kristalline Struktur der gesputterten AlN-Schicht

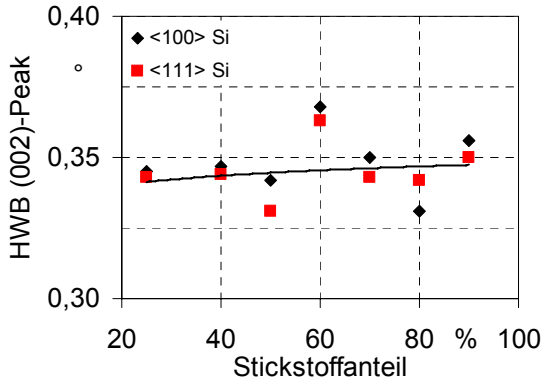


Abb. 3: Einfluss des Stickstoffanteils in der reaktiven Sputteratmosphäre auf die kristalline Struktur der gesputterten AlN-Schicht

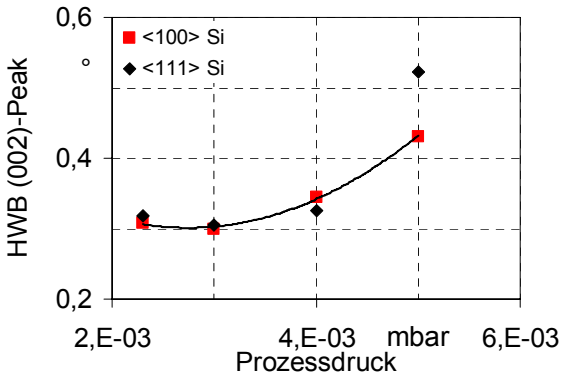


Abb. 4: Einfluss des Prozessdruckes auf die kristalline Struktur der gesputterten AlN-Schicht

Anhand dieser Untersuchungen konnte ein Parameterfeld zur Herstellung von piezoelektrischen AlN-Schichten erschlossen werden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden die für die weiteren technologischen Untersuchungen benötigten Schichten hergestellt. Bei den Messungen der Spannung der gesputterten Schichten zeigte sich eine generelle Abhängigkeit der Schichtspannung von allen Abscheideparametern. Interessant dabei ist der Parameter des Stickstoffanteils in der reaktiven Sputteratmosphäre. Beim Vergleich des Einflusses dieses Parameters auf die kristalline Schichtstruktur mit den anderen Parametern zeigt sich eine sehr geringere Abhängigkeit der ermittelten HWB des Röntgenbeugungsspekt-

rums, was auf einen geringen Einfluss auf die kristalline Struktur schließen lässt. Dagegen kann die Schichtspannung durch den Stickstoffanteil vom Druck- bis in den Zugbereich variiert werden. Dieser Fakt macht den Stickstoffanteil zu einem freien Prozessparameter um die Schichtspannung gezielt einzustellen.

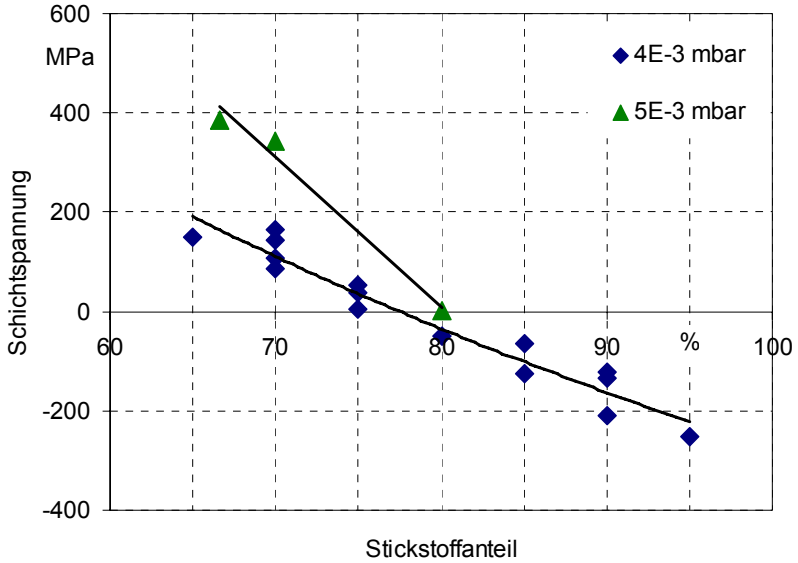


Abb. 5: Einfluss des Stickstoffanteils auf die Schichtspannung aufgenommen bei zwei unterschiedlichen Prozessdrücken

Der Zusammenhang zwischen Stickstoffanteil in der reaktiven Sputteratmosphäre und der Spannung in den AlN-Schichten ist in Abb. 5 für zwei unterschiedliche Prozessdrücke grafisch dargestellt. Um hochempfindliche Membranstrukturen zur Messungen von Schalldruckschwingungen zu erzeugen, ist es unbedingt erforderlich für annähernde Stressfreiheit zu sorgen. Druckspannungen würden zum Ausknicken der Membranstruktur führen und die Sensormembran unbrauchbar machen. Zu stark zugverspannte Schichten hingegen würden die Empfindlichkeit der Membran stark sinken lassen. Abb. 6 und Abb. 7 zeigen die beiden beschriebenen Fälle. Angestrebt ist ein Zugspannungsbereich von 0 bis 50 MPa.

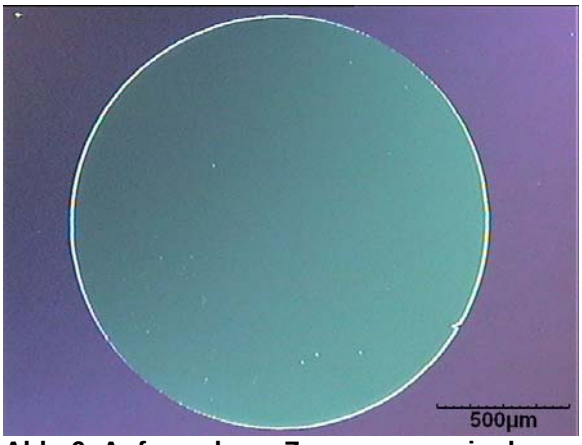


Abb. 6: Aufgrund von Zugspannung in der AlN-Schicht glatt aufgespannte Membran

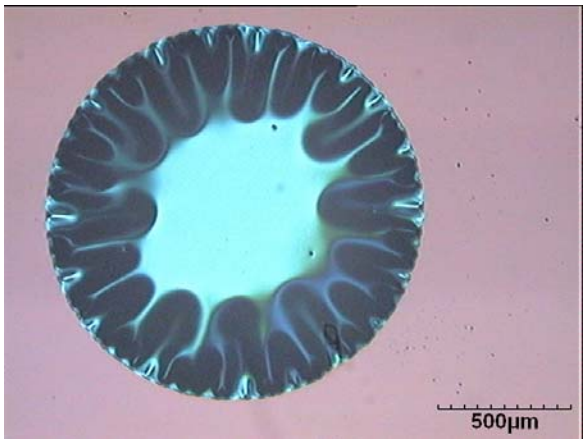


Abb. 7: Aufgrund von Druckspannung in der AlN-Schicht verwölbte Membran

An den Schichten mit den besten kristallinen Eigenschaften wurden der piezoelektrische Koeffizient d_{33} mit dem Verfahren der Piezoresponse Force Microscopy bestimmt, um ein Maß für die mögliche piezoelektrische Kopplung zu erhalten. Der Wert für den Koeffizienten wurde im Bereich zwischen 4,7 und 6,6 pm/V bei unterschiedlichen Proben ermittelt. Diese Werte stimmen gut mit denen in der Fachliteratur gefundenen Werten überein.

Entwicklung und Evaluierung von effizienten Verfahren zur Herstellung und Strukturierung eines geeigneten Membranmaterialsystems auf der Basis von AlN, welches hinreichend große mechanische Festigkeit und piezoelektrische Koeffizienten und Kopplungskoeffizienten besitzt

Zur Herstellung von dünnen freitragenden piezoelektrischen AlN-Membranen kommt das Siliziumtiefenätzen zum Einsatz. Nach erfolgter Herstellung der AlN-Schicht (1) findet eine Lithografie mit Dicklack statt (2), der gleichzeitig die Ätzmaskierung bildet. Abschließend findet ein DRIE Ätzprozess zur Strukturierung des Siliciumvolumens statt (3).

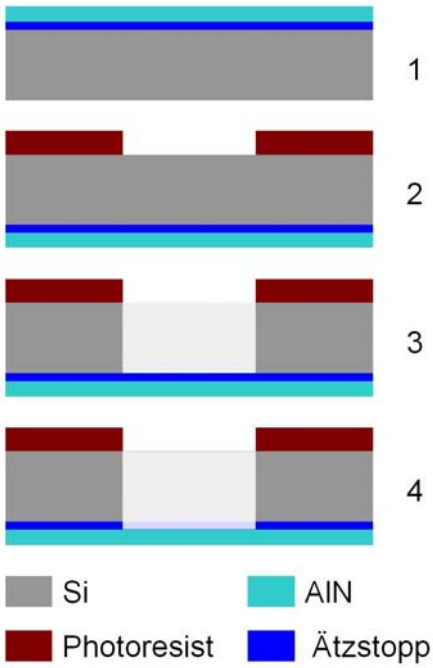


Abb. 8: Flowchart der Herstellung von freitragenden Membranen aus AlN

Das AlN ist im Tiefenätzprozess so stabil, dass es direkt als Ätzstoppschicht genutzt werden kann. Wenn als membranbildendes Material nicht nur AlN eingesetzt wird, dann muss unter Umständen eine zusätzliche Ätzstoppschicht vorgesehen werden, die abschließend noch entfernt werden kann. (4) Für die ersten Teststrukturen wurde eine reine AlN-Schicht als Membran gewählt und verschieden Geometrien als trägerlose AlN-Membranen umgesetzt. Dabei wurde ein maximales Aspektverhältnis von 10.000 (Membrandurchmesser zu Schichtdicke) erreicht. Abb. 9 und Abb. 10 zeigen zwei so prozessierte Membranen. Dabei ist neben runden Membranen als Teststruktur auch eine trapezförmige Membranstruktur entstanden. Die Ergebnisse der Membranstrukturierung und die Messungen der dünnen AlN-Membranen mit dem Laservibrometer MSA 400 von Polytec unterstreichen die sehr guten mechanischen Eigenschaften der gesputterten AlN-Schichten.

Aus den durchgeführten Arbeiten wird die Möglichkeit akustische Sensoren mit unterschiedlichen Geometrien mit diesem Materialsystem aufzubauen ersichtlich.

Simulation einer flexiblen piezoelektrischen Membran zur Evaluierung von Prozesseinflussfaktoren und zur Auslegung ihrer Formgebung, um das gewünschte ortsaufgelöste Resonanzverhalten zu erzielen, sowie für die durch die Auflösung der Fotolithographie limitierte Elektrodengestaltung

Bei der Bearbeitung dieses Arbeitspaketes wurde mit der runden Membrangeometrie gestartet, um das entwickelte Simulationsmodell für das FEM-System ANSYS zu testen. Abb. 11 zeigt die mit einem scannenden Laservibrometer (Polytec MSA 400) vermessenen Kreismembran und ihre Eigenschwingungen. Mit Hilfe

dieser Technik wurde durch Vergleich der gemessenen Eigenfrequenzen mit den Simulation eine Überprüfung des Modellansatzes ermöglicht.

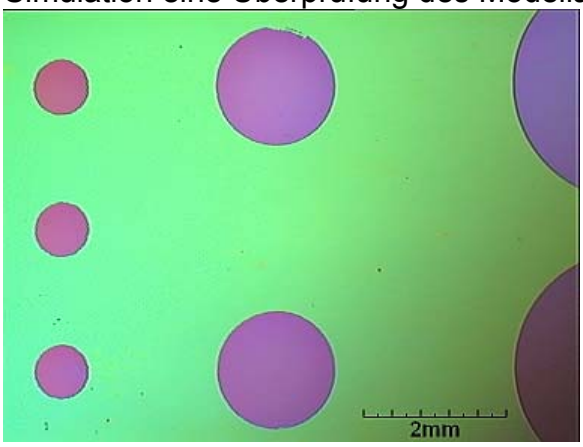


Abb. 9: Runde AlN-Membranen unterschiedlicher Durchmesser

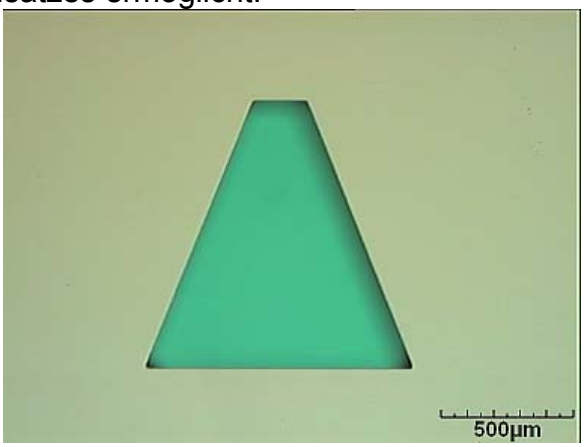


Abb. 10: Trapezförmige AlN-Membran

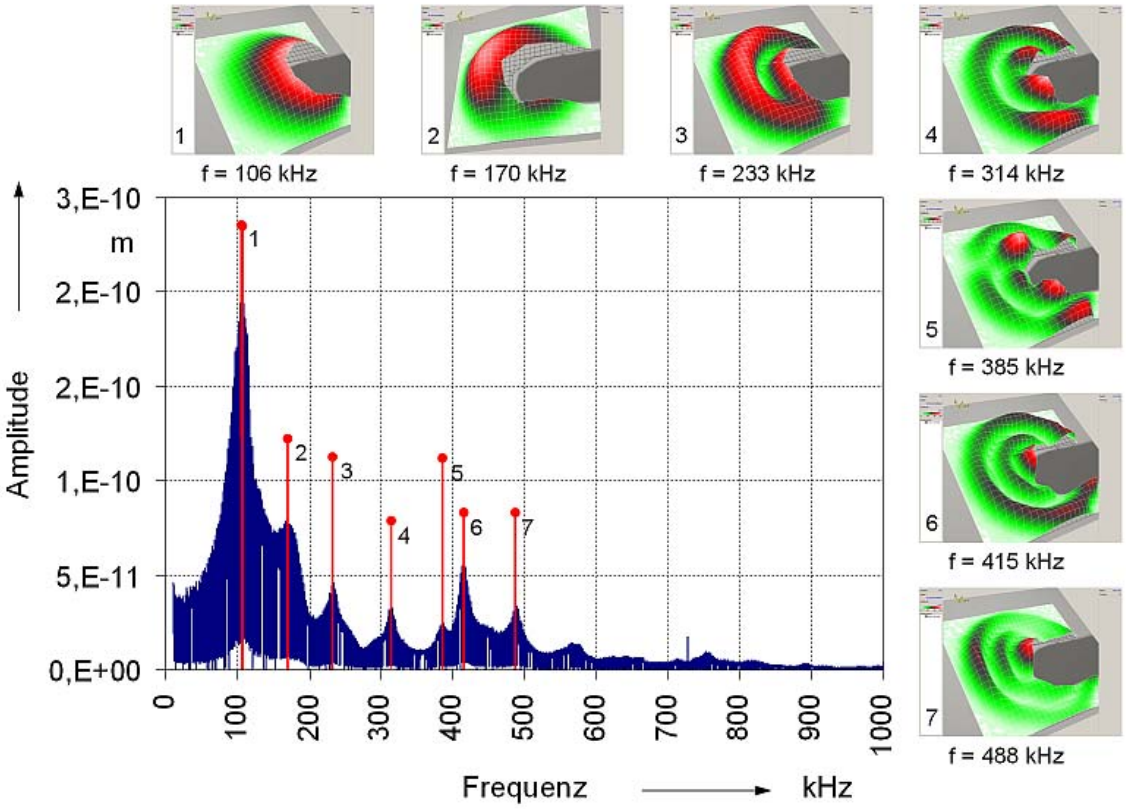


Abb. 11: Frequenz-Antwort-Funktion der elektrostatisch angeregten AlN-Membran aufgenommen mit dem MSA 400 Laservibrometer

Nach der Modellierung von einfachen Geometrien wurden zu komplexeren Formen übergegangen, um eine mögliches Membrandesign zu identifizieren, welches die gewünschte ortsabhängige Frequenzselektivität aufweist. Dazu wurde ein parametrisiertes Modell mit einer trapezförmigen Membran mit unterschiedlichen Einspannungssituationen erarbeitet. Erste Simulationen mit allseitig eingespanntem Rand ergaben, dass mit einer solchen Anordnung nicht die gewünschte

ortsaufgelöste Frequenzmessung realisierbar ist. Nach Anpassung der Randbedingungen und der Geometrie ist es gelungen eine Ortsabhängigkeit des Maximalwertes der einzelnen Eigenfrequenzen zu erreichen (vgl. Abb. 12) Dieses Modell deutet an, wie ein Bauelement aussehen kann um die geforderte Funktion zu realisieren.

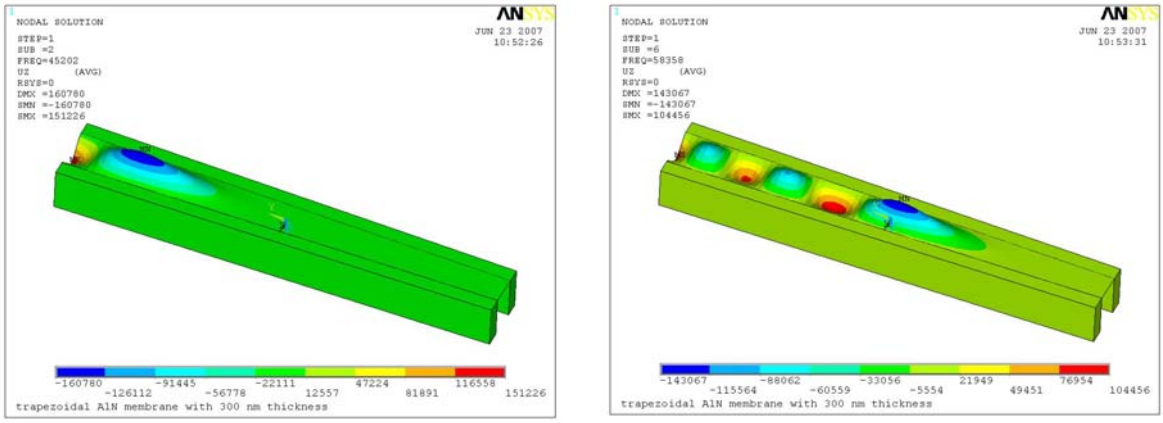


Abb. 12: Zwei Eigenformen mit lokal unterschiedlichem Schwingungsmaximum.

Bei sämtlichen Simulationsansätzen wurde davon ausgegangen, dass die Schichten nahezu stressfrei aufgebracht sind und homogene Schichtdicken aufweisen. Hier zeigten sich noch Defizite beim entwickelten Abscheideverfahren hinsichtlich der Homogenität der Schichteigenschaften über den Wafer. Wenn eine Schicht laut Messung nahe an der 0 MPa Grenze war, zeigten sich beim Freilegen der Membranen glatte Strukturen in der Wafermitte und verwölbte Strukturen zum Waferrand hin. Da aber für ein Bauelement zur Detektion von akustischen Frequenzen eine relative große laterale Ausdehnung erforderlich ist, konnten die abgeschiedenen Schichten hinsichtlich der mechanischen Schichteigenschaften diesen Anforderungen nicht gerecht werden. Geschuldet ist dies der verfügbaren Anlagentechnik. Mit der vorhandenen Anlagentechnik war es nicht möglich die Schichtdickenschwankung vom Waferrand zur Wafermitte deutlich unter 30% zu senken.

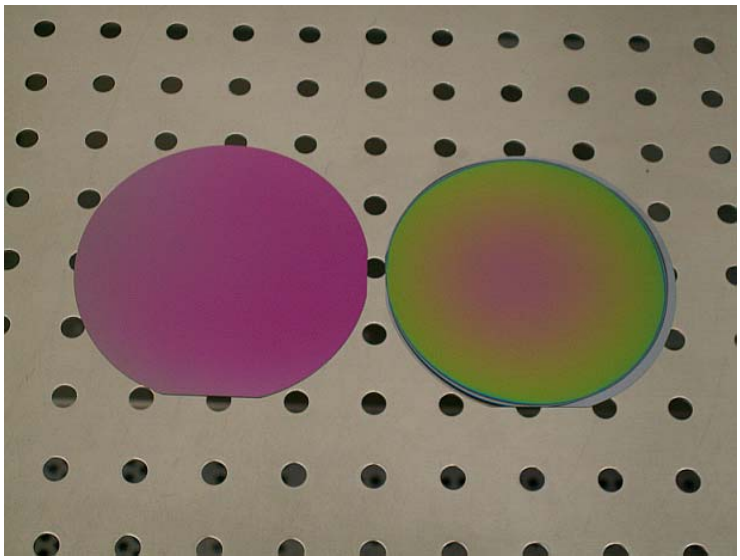


Abb. 13: Vergleich zwischen der HF gesputterten AlN-Schicht (rechts) und der extern mit gepulstem DC Sputtern hergestellten AlN-Schicht (links)

Um einen Weg zur Umsetzung des Bauelementekonzeptes zu erschließen, wurde in der letzen Projektphase ein Prozess für homogenere Schichten extern untersucht. Dazu wurden vom FEP in Dresden Schichten mit gepulster DC Anregung gesputtert. Mit dem dazu eingesetzten Doppelringmagnetron als Sputterquelle können Schichten auf Substraten bis zu 300 mm Durchmesser ausreichend homogen hergestellt werden. Es zeigte sich, dass bei einer kleinen Parameterstudie ebenfalls orientiertes piezoelektrisches Material hergestellt werden konnte.

Erarbeitung eines Herstellungsverfahrens für großflächige Membranen mit komplexen Geometrien und multiplen Resonanzfrequenzen

Mit der während der Projektlaufzeit intern zur Verfügung stehenden Technologie konnten auf Grund der Einschränkungen der Schichthomogenität nur Teilaspekte des Arbeitspaketes bearbeitet werden.

Es wurden die technologischen Fragestellungen zum Aufbau eines piezoelektrischen Membransensors untersucht. Dazu war es nötig das entsprechend orientierte AlN-Schichtmaterial auf einer leitfähigen Materialstruktur abzuscheiden, die als Grundelektrode genutzt werden kann. In einer Versuchsreihe fand der Test unterschiedlicher Metalle als Startschichten für das AlN-Wachstum statt. Es stellten sich Chrom, Aluminium, Gold und Platin als geeignet heraus.

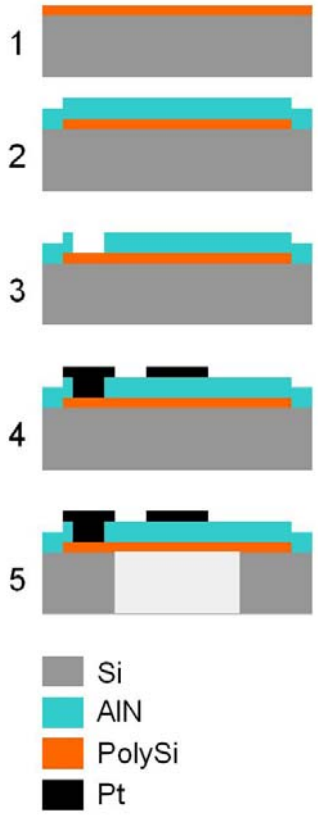


Abb. 14: Ablauf der Sensorprozessierung

Dabei wurden mit Gold und Platin die besten Ergebnisse erzielt. Aus diesem Grund wurden diese beiden Materialien für die Grundelektrode der Bauelemente eingesetzt. Abb. 14 zeigt die technologische Umsetzung der Bauelemente. Als Grundelektrodenmaterial wird in diesem Fall entweder dotiertes Polysilicium oder eine dünne Platinschicht genutzt (1). Nach der Strukturierung der unteren Elektrodenstruktur findet die Abscheidung der AlN-Schicht statt. (2) Anschließend erfolgt die Strukturierung der AlN-Schicht um den Kontakt zu Grundelektrode wieder herzustellen. (3) Danach wird mittels Platin die untere Elektrode kontaktiert und die obere Elektrode aufgebracht (4). Abschließend wird der Siliciumbulk von der Waferrückseite mittels DRIE Ätzung strukturiert und die Membran damit freigestellt. Im Falle der Polysilicium Grundelektrode wird noch eine dünne Ätzstoppschicht aus Siliciumdioxid zu Beginn des Prozesses integriert, die nach erfolgter Siliciumstrukturierung entfernt werden kann. Die so hergestellten Sensorelemente hatten unterschiedliche Membranformen und Membrangrößen. Die Größen reichten von 500 µm bis hin zu 3 mm. Als Formen kamen runde und rechteckige Membranen zum Einsatz. Abb. 15 und Abb. 16 zeigt exemplarisch zwei auf diese Weise hergestellte Sensorstrukturen.

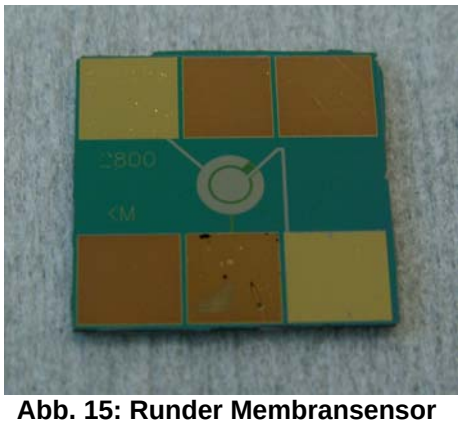


Abb. 15: Runder Membransensor

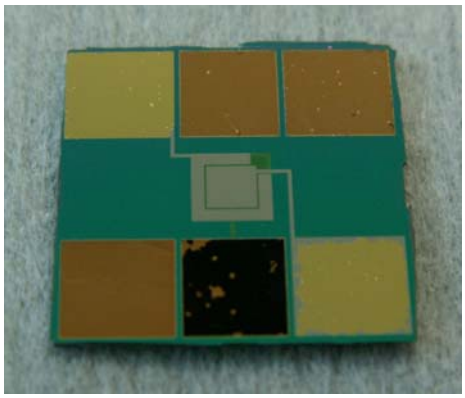


Abb. 16: Rechteckiger Membransenor

Systemkonzept und Test von unterschiedlichen Membransystemen, Auslesestrukturen und –mechanismen

Für den Test von Membransystemen wurde ein Versuchsstand mit akustischer Anregung aufgebaut. Neben der Aufnahme des elektrischen Signals wurde ein Laservibrometer zur Aufnahme der mechanischen Auslenkung integriert.

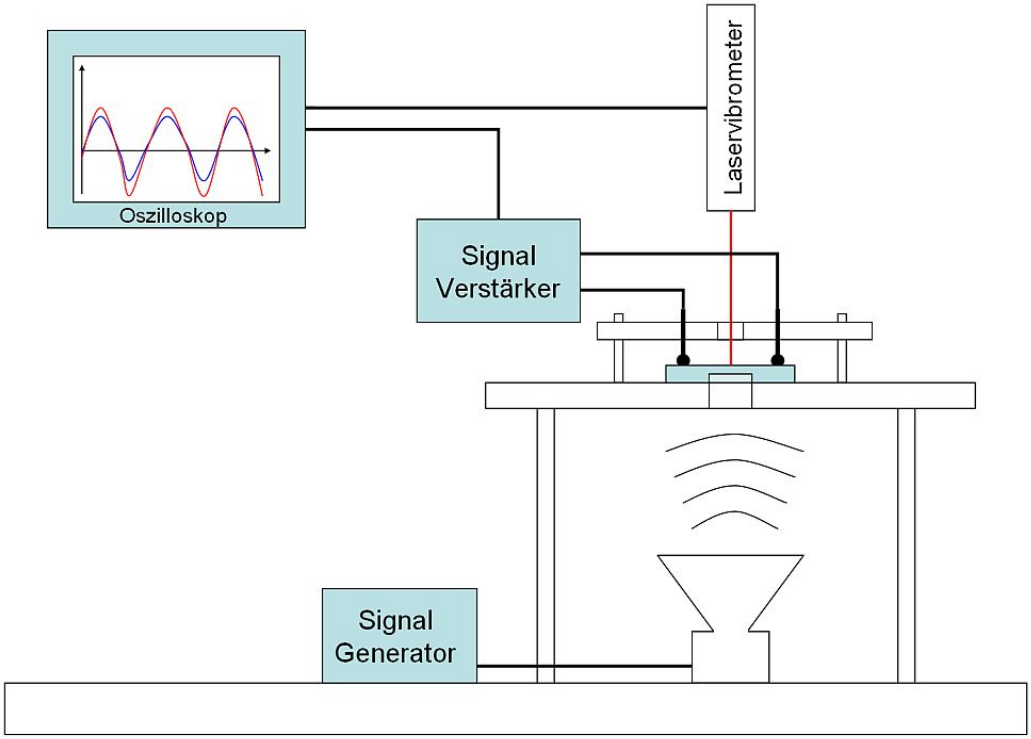


Abb. 17: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Anregung und Vermessung der Membransensoren

An den ersten fertig gestellten Membransystemen konnten ein grundlegender Funktionsnachweis erbracht werden.

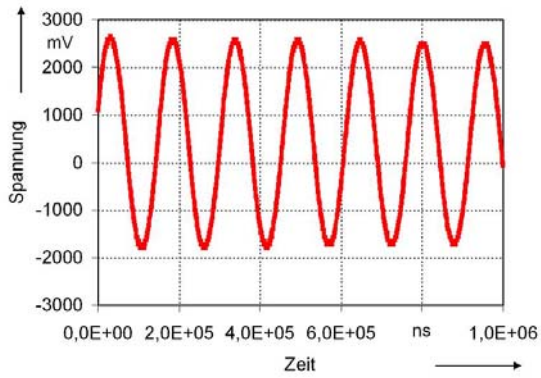


Abb. 18: Schwingungssignal einer runden Sensormembran, aufgenommen mit einem Laservibrometer

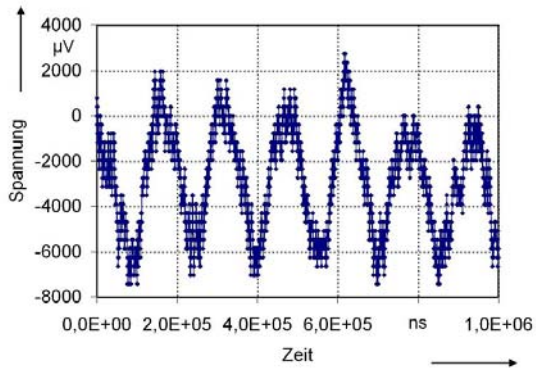
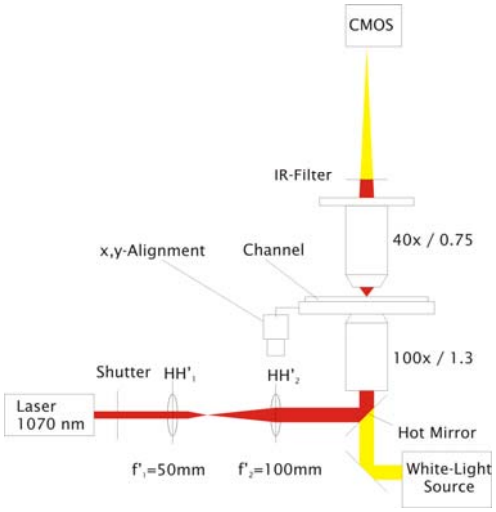


Abb. 19: Elektrisch verstärktes Wanderlersignal der vermessenen runden Sensormembran

Für weiterführende Arbeiten bleibt die Stabilisierung der Schichtspannung nahe 0 MPa offen. Es kann dazu auch über geeignete Mechanismen zu Spannungskompensation nachgedacht werden. Weiterhin ist eine Stabilisierung der elektrischen Eigneschaften (z.B. der Durchbruchspannung) von großer Bedeutung für den Einsatz der AlN-Schichten in komplex aufgebauten Sensorsystemen.

B) PHOTOFLUID

Das Teilprojekt PHOTOFLUID gliederte sich in sechs Arbeitspakete. Im Arbeitspaket B1 wurden der Aufbau und die Demonstration einer optischen Pinzette durchgeführt. Ziel des Versuchsstandes war es, ihn aus einzelnen Bauteilen in einem freistehenden Versuch aufzubauen anstatt die Pinzette in ein invertiertes Mikroskop, wie es in der biotechnologischen Anwendung üblich ist, zu integrieren. Dies bietet bei den weiteren experimentellen Arbeitspaketen B3 und B5 die Möglichkeit, die Justierung und nötige Änderungen der Geometrie unkompliziert durchführen zu können.

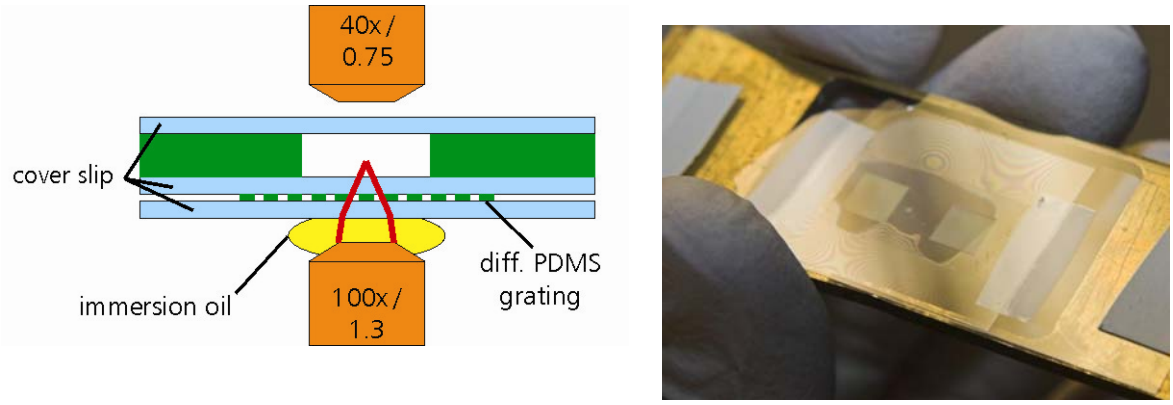


(a) (b)

Abb.20: a) Prinzipskizze des Versuchstandes „optische Pinzette“ und b) Photo des Experiments.

Die Funktionstüchtigkeit der Pinzette (siehe Abb. 3 a und b) und die erfolgreiche Justage konnten durch gelungene dreidimensionale Manipulation von Polysterene

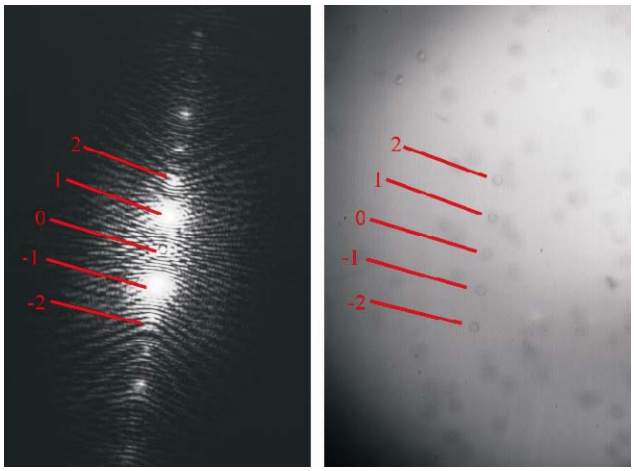
Partikeln (sog. beads) mit Durchmessern von 3 µm in einem opto-fluidischen System reproduzierbar nachgewiesen werden. Bei der Justierung konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die in die Experimente der Arbeitspakete B3 und B5 eingeflossen sind.
Im Zentrum des Interesses in Arbeitspaket B2 standen das Design und die Herstellung mikrooptischer Strukturen für die Erzeugung exakt definierter Lichtverteilungen in einem fluidischen Kanal. Diese Lichtverteilungen werden mit Hilfe beugungsoptischer Elemente erzeugt und durch das optische System in den Fluidikkanal projiziert. Diese diffraktiven Strukturen können in den Pinzettenaufbau entweder mittels eines spatialen Lichtmodulators (SLM) auf Flüssigkristallbasis oder durch die direkte Integration in die Kanalwand des Systems eingebunden werden. Zur Berechnung der beugungsoptischen Strahlformer wurden verschiedene Algorithmen untersucht, z.B. zur Erzeugung von Laguerre-Gauss-Moden, Besselmoden oder iterative optimierte Vielfachstrahlteiler. Insbesondere iterativ optimierte Vielfachstrahlteiler liefern ein sehr gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis.
Ziel des Arbeitspakets B3 ist die Integration der strahlformenden Elemente in die Kanalwand. Hierfür wurden die oben berechneten diffraktiven Strahlteiler in Silizium als Master für die Abformung in PDMS (Polydimethylsilloxan) hergestellt. Als Alternative zur lithographischen Herstellung der Master für optofluidische Systeme wurden erste Versuche zur Ultrapräzisionsbearbeitung verschiedener, für die Biotechnologie interessanten, Werkstoffe (z.B. PEEK, PSU, PPSU) durchgeführt. PDMS wird in der Mikrofluidik häufig zur Herstellung fluidischer Kanalsysteme verwendet, da es in Verbindung mit Glas den Kanal hervorragend gegen Gas- und Flüssigkeitslecks abdichtet und im verwendeten Wellenlängenbereich des Lasers optisch transparent ist. Im Gegensatz zur Herstellung mikrofluidischer Kanäle wie sie üblicher Weise in der Literatur gefunden werden, sind die Randbedingungen für die Integration der diffraktiven Elemente in die Kanalwand sehr viel enger gefasst. Vorraussetzung für erfolgreiches dreidimensionales Manipulieren ist eine hohe numerische Apertur (NA) der durch Mikroskopobjektive erzeugten Strahlbündel. Hierfür werden Wasser- oder Öl-Immersionsobjektive mit einer NA von 1,3 verwendet. Diese Objektive sind auf eine Deckglasdicke von 170 µm und einem Arbeitsabstand von 200 µm optimiert. Daraus ergibt sich die Forderung die strahlformenden Elemente in einem neu zu optimierenden Herstellungsprozess auf Deckgläsern der Dicke 130 µm – 170 µm abzuformen. Das abgeformte Element muss im nächsten Schritt mit einem weiterem Glas abgedeckt werden, so dass sich eine Sandwich-Konstruktion ergibt. Dieser Aufbau verhindert sowohl das Indexmatching durch die Kanalflüssigkeit als auch durch das Immersionsöl, welches die Funktionalität des beugungsoptischen Bauelementes beeinträchtigt. Diese Aufbautechnik wurde zunächst mit einfachen binären Beugungsgittern demonstriert. Der gesamte Prozess unterscheidet sich nicht für binäre und mehrstufige Strahlteilerelemente. Für mehrstufige Strahlteiler wird allerdings der Herstellungsprozess für den Prägemaster aufwendiger.



(a) (b)

Abb.21: a) Prinzipskizze der Sandwich-Konstruktion des in die Kanalwand integrierten diffraktiven Strahlteilers und b) Photo einer realisierten Abformung.

Die Ergebnisse des Manipulationsexperiments mit einem optischen Gitter der Periode 10 µm sind in Abbildung 22a und b dargestellt. Deutlich ist in Abbildung 22a zu erkennen, dass ein Großteil der Intensität in der ± 1. Beugungsordnung fokussiert wird. Dennoch zeigt sich, dass die Intensität in der 0. und ± 2. Beugungsordnung ausreichend ist, Mikropartikel dreidimensional zu manipulieren. In den höheren Beugungsordnungen (ab ±3.) ist die Intensität dafür zu gering. Zusätzlich macht sich hier die zum Rand hin abfallende Fokusqualität bemerkbar, so dass dort keine Partikel eingefangen werden konnten.



(a) (b)

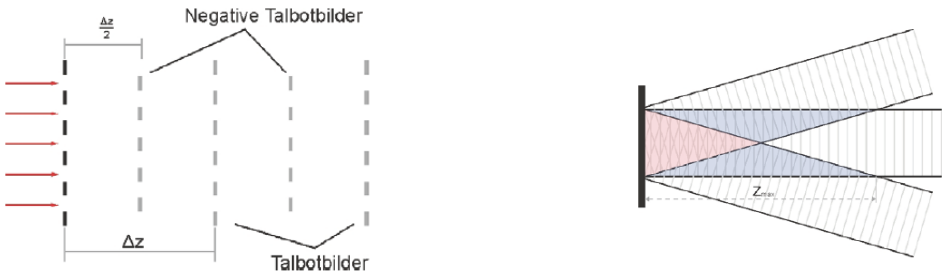
Abb.22: a) Beugungsbild des optischen Gitters im Kanal und b) fünf dreidimensional gefangene Mikropartikel in den Beugungsordnungen (Aufnahme mit IR-Filter, so dass die Laserstrahlung nicht sichtbar ist).

Im Mittelpunkt des Interesses von Arbeitspaket B4 standen periodische Lichtverteilungen (d.h. elektromagnetische Feldverteilungen) zur Beeinflussung des Partikelflusses innerhalb des fluidischen Systems z.B. zur Ablenkung oder Sortierung. Zu diesem Zweck wurden mit beugungsoptischen Elementen oder dem verallgemeinerten Phasenkontrast („generalized phase contrast“ GPC) verschiedene Methoden untersucht um die notwendigen Feldverteilungen zu erzeugen. Im Laufe des Projektes stellte sich heraus, dass der Talbot Effekt einige für die angestrebte Funktionalität besonders attraktive Eigenschaften aufweist. Schließlich wurde mit

den non-diffracting beams oder Besselstrahlen Methoden die axiale Strahlformung entwickelt und für die Anwendung untersucht.

- Der Einsatz beugungsoptischer Elemente (Computer generierte Hologramme) führt zu dem Grundaufbau der in der Literatur häufig als „Holographic Optical Tweezers (HOT)“ bezeichnet wird. Das beugungsoptische Element und die in dem Kanal erzeugte Lichtverteilung sind dabei über die Fraunhoferbeugung, die mathematisch über eine Fouriertransformation berechnet wird, miteinander verknüpft. Daher wird die beugungsoptische Struktur in die Pupille des Mikroskopobjektives abgebildet und durch die Abbildung mittels des Objektivs das Beugungsbild im Kanal erzeugt. Für das entwickelte optische Pinzettensystem wurden eine Vielzahl beugungsoptischer Bauelemente entworfen und die gewünschten Lichtverteilungen mit Hilfe des integrierten Lichtmodulators in den fluidischen Kanal projiziert.
- Das generalisierte Phasenkontrastverfahren (GPC) nach Glückstad ermöglicht die einfache Erzeugung beliebiger zweidimensionaler Feldverteilungen in einem fluidischen System. Anders als bei der klassischen optischen Pinzette wird hierbei nicht mit hochaperturigen Mikroskopobjektiven gearbeitet, sondern mit Objektiven mit kleineren numerischen Aperturen und somit längeren Arbeitsabständen. Dieser Aspekt ist von großer Bedeutung für die Realisierung optischer Manipulation in realen komplexen mikrofluidischen Kanalsystemen, die häufig Kanalwände mit einer Dicke von einigen 100 Mikrometern haben. Das Prinzip des Phasenkontrasts ermöglicht, Phasenobjekte durch spatiale Filterung in ein Intensitätsprofil umzuwandeln welches in den Kanal abgebildet wird. Jeder Phasenwert entspricht nach der Filterung einem Intensitätswert. Durch den Einsatz eines schnellen Flüssigkristall Phasenmodulators wird es somit möglich Änderungen der Intensitätsverteilungen schnell zu aktualisieren, ohne ein neues CGH berechnen zu müssen, wie es im Fall der HOT-Systeme erforderlich ist. In Kombination mit einem Counterpropagating System, d.h. mit einem System, in dem die Intensitätsverteilung nicht nur von einer Seite, sondern von zwei gegenüberliegenden Seiten in das Kanalsystem eingebracht wird, kann in Verbindung mit dem GPC-Ansatz auch eine dreidimensionale Manipulation erfolgen. Aufgrund dieser zusätzlichen Möglichkeiten und der hervorragenden Eignung des GPC Ansatzes wurde in Erweiterung des Arbeitsplanes neben dem klassischen Pinzettensystem auch ein System konzipiert, entworfen und aufgebaut. Erste Tests zur optischen Manipulation innerhalb mikrofluidischer Kanalsysteme mit diesem System sind geplant.
- Die Selbstabbildung eines periodischen diffraktiven Elements ist eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung einer geeigneten elektromagnetischen Intensitätsverteilung in einem fluidischen System. (vgl. Abb. 23a). Der Talbot Effekt ist ein klassischer Beugungseffekt der in elektromagnetischen Feldern in skalarer Näherung auftritt. Er führt dazu, dass ein periodisches Beugungsgitter ohne optische Hilfsmittel (z.B. Linsen) eine Periodizität der elektromagnetischen Feldverteilung in axialer Richtung erzeugt. Diese führt dazu, dass in periodischen Abständen wieder ein Interferenzmuster entsteht, das einem „Bild“ des Gitters entspricht. Während im Falle der klassischen Abbildung alle Ausbreitungsrichtungen hinter dem Gitter (d.h. die Beugungsordnungen) durch die Linsen übertragen und in der Bildebene phasengleich überlagert werden, entsteht die „Selbstabbildung“ in den Ebenen in denen die Beugungsordnungen jeweils um ganzzahlige Vielfa-

che von 2π phasenverschoben überlagern. Diese Ebenen haben in Ausbreitungsrichtung den Talbotabstand $\Delta z = 2d^2/\lambda$ (d: Periode des Gitters und der Wellenlänge der einfallenden Strahlung λ). Aufgrund der Tatsache, dass die Beugungsordnungen nicht durch optische Bauelemente in ihrer Richtung abgelenkt und abgebildet werden sondern ihre Ausbreitungsrichtung beibehalten entsteht der sog. „walk-off“ Effekt. Er bewirkt, dass die Talbot-Selbstabbildung nur, abhängig von der Gitterperiode und der Anzahl der Gitterperioden, bis zu einer bestimmten Entfernung $z_{max}=Md/\tan(\alpha)$ (mit der Periode d, der Anzahl der Perioden M und dem Beugungswinkel der ersten Beugungsordnung des Gitters α) beobachtet werden (Abb. 23b).



(a) (b)

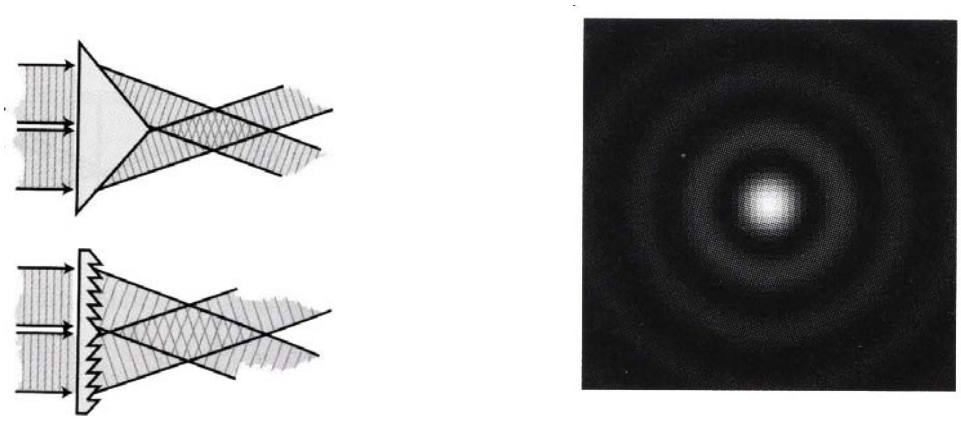
Abb.23: a) Selbstabbildungseffekt eines Gitters und b) maximale Abbildungsweite

Für die Integration in mikro-opto-fluidischen Systemen ist der Talboteffekt von großem Interesse, da er die Erzeugung periodischer Feldverteilungen mit großem Feldgradienten zur optischen Manipulation ohne Optiken mit großer numerischer Apertur ermöglicht. Die Gitter müssen in diesem Fall so ausgelegt werden, dass eine möglichst große Anzahl an Talbotebenen in dem Kanal auftreten. Vorteil dieser Technik ist, dass kein Mikroskopobjektiv zur Abbildung benötigt wird und somit keine Probleme mit zu geringen Arbeitsabständen auftreten. Wichtig für lichteffiziente Systeme ist an dieser Stelle, dass durch Ausnutzung von Zwischenebenen, die bei Bruchteilen der Talbotlänge (z.B. ¼ Δz) liegen, Phasengitter z.B. in Amplitudengitter umgewandelt werden. Somit können ohne Lichtverlust in Amplitudengittern in den entsprechenden Selbstabbildungsebenen hohe Feldgradienten erzeugt werden.

Für die Schaltung von Kanälen, d.h. zur Ablenkung der Partikel in einen bestimmten Kanal sind lang gezogene Lichtverteilungen oder Arrays von Spots erforderlich. Aufgrund ihrer Periodizität können solche Lichtverteilung sehr gut über die Talbot Selbstabbildung erzeugt werden. Verschiedene periodische Beugungsstrukturen zur Erzeugung der gewünschten Lichtverteilungen über die Talbot Selbstabbildung und zur Untersuchung ihrer Wirkung auf die Flusseigenschaften des mikrofluidischen Kanalsystems wurden entworfen, hergestellt und mit dem fluidischen System integriert.

- Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Lichtverteilungen mit großer Schärfentiefe ist die Anwendung sog. Besselbeams. Diese entstehen durch die Interferenz verkippter ebener Wellenfronten die z.B. an einem Axikon (refraktiv oder diffraktiv) oder an eine Ringblende bei Beleuchtung mit einer ebenen Welle entstehen (siehe Abb. 24a). In der Aufsicht auf das Strahlpro-

fil ist deutlich das Intensitätsmaximum im Zentrum des Strahles zu erkennen (siehe Abb. 24b). Von den Rändern des Strahlprofils aus, wandern bei der Anwendung in einem fluidischen Kanal, die Partikel zum Zentrum und werden in die Bildebene hinein weggedrückt. Aufgrund ihrer großen Schärfentiefe ist zu erwarten, dass z.B. 2D Arrays aus Besselstrahlen die Effizienz der Ablenkung bzw. Sortierung von Mikropartikeln in mikrofluidischen Kanälen deutlich verbessern. Entsprechende Versuche wurden im Rahmen der Arbeiten in B4 konzipiert und werden in naher Zukunft umgesetzt.



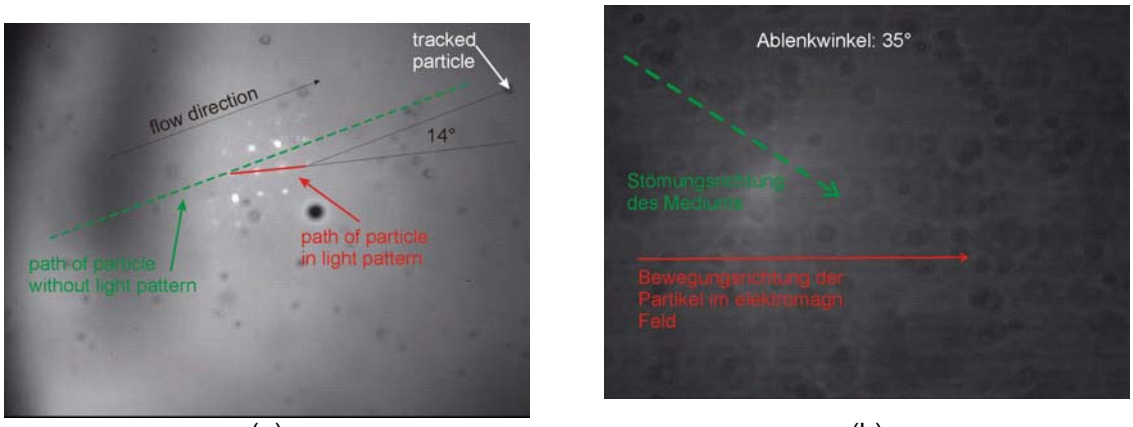
(a) (b)

Abb. 24: a) Erzeugung eines Besselbeams durch ein refraktives oder diffraktives Axikon, b) Intensitätsverteilung eines Besselbeams in Aufsicht

Im Arbeitspaket B5 wurde der Einfluss elektromagnetischer Feldverteilungen auf die Flusseigenschaften von Mikropartikeln in einem fluidischen System untersucht. In Erweiterung des Ansatzes, der in Arbeitspaket B3 beschrieben ist, wurde die optofluidische Integration erfolgreich vorangetrieben. Neben der Erzeugung der Feldverteilung in einem in der Literatur als „Holographic Optical Tweezers (HOT)“ bezeichneten Systems mittels SLM (siehe oben) ist in diesem Arbeitspaket basieren auf dem Ansatz des Arbeitspaketes B3 die Integration des diffraktiven Strahlteilers in die Kanalwand durchgeführt worden.
Durch diesen Ansatz kann zum einen das Beugungsbild des diffraktiven optischen Elements beziehungsweise der Talboteffekt, d.h. die Selbstabbildung des DOE zur Erzeugung der gewünschten elektromagnetischen Feldverteilung genutzt werden. Mit Hilfe des integrierten beugungsoptischen Vielfachstrahlteilers konnte eine Ablenkung der, in der fluidischen Strömung transportierte Mikropartikel, demonstriert werden. Durch die periodische Anordnung der Fokuspunkte (d.h. der fokussierten Beugungsordnungen) im Kanal, die optische Pinzetten darstellen, wurden die im Fluss befindlichen Partikeln um bis zu 20° abgelenkt, bevor sie wieder die ursprüngliche Flussrichtung des Mediums annahmen, nachdem Sie den Bereich ohne Feldverteilung (Fokuspunkte) erreichten. Die Partikel werden sobald Sie in die nähe eines Fokuspunkten kommen von der Gradientenkraft in den Bereich höchster Intensität gezogen. Die Haltekraft der optischen Pinzetten ist jedoch so eingestellt, dass sie die durch die Strömung weitergetriebenen Teilchen nicht vollständig halten kann. Durch die äußere Kraft des strömenden Mediums werden sie daher wieder aus diesen herausgeschlagen und geraten in den Wirkungsbereich der benachbarten optischen Falle. Das Ergebnis für Partikel die um 14° abgelenkt wurden ist in Abb. 25a dokumentiert. Aufgrund der sensiblen Ausbalancierung der

Kräfte in diesem System ist es mit diesem Konzept auch möglich eine Sortierung der Mikropartikel nach Größe bzw. nach Brechzahl durchzuführen.

Zum Erreichen einer ausreichenden Stärke der optischen Fallen mussten in diesem Versuchsaufbau Immersionsobjektive mit einer hohen numerischen Apertur (Nikon 100x/1,3) verwendet werden. Diese sind auf die Deckglasdicke 0,17 mm und einen kleinen Arbeitsabstand (0,2 mm) optimiert. Für Fluidiksysteme mit dickeren Kanalwänden mussten daher alternative Verfahren entwickelt werden. Diese führten zur der oben bereits beschriebenen Ausnutzung der Selbstabbildung zur Erzeugung ablenkender elektromagnetischer Feldverteilungen.



(a) (b)

Abb. 25: Auswertung der Beeinflussung der Bewegungsrichtung eines Partikels im Fluss a) mittels diffraktiven Strahlteiler und b) mittels Talboteffekt.

Soll der Selbstabbildungseffekt des DOEs ausgenutzt werden, kann das Mikroskopobjektiv aus dem Strahlengang entfernt werden oder durch ein Objektiv mit geringerer Apertur ersetzt werden. Der Laserstrahl fallt damit parallel oder schwach konvergent auf das DOE ein. Somit können Einschränkungen aufgrund des geringen Arbeitsabstandes und der dicken Kanalwände überwunden werden. Für die Experimente wurde als DOE ein in PDMS abgeformtes eindimensionales Gitter mit einer Gitterperiode von 10 µm verwendet. Das Experiment zeigte, dass es auch in diesem Fall möglich ist, die Partikel im Fluss abzulenken, allerdings wurde eine sehr höhere Laserausgangsleistungen (3,5 Watt) benötigt. Ursache dafür ist die deutlich geringere Lokalisierung (Fokussierung) der elektromagnetischen Feldenergie. Das 1D Gitter erzeugt in den Ebenen der Selbstabbildung Fokuslinien. Demgegenüber steht die punktuelle Fokussierung die mit den Beugungsgittern in der Fraunhofer Beugungsebene erzeugt wird (Abb. 25a). Der mit Hilfe der Talbot Gitter experimentell demonstrierte Ablenkwinkel betrug in diesem Experiment 35°. Ein Bild aus einem Video ist in Abb. 25b zur Dokumentation mit eingezeichneten Richtungsvektoren zu sehen.

Die Wechselwirkung mit dem elektromagnetischen Feld (Arbeitspaket B6) resultiert im Wesentlichen in zwei Kraftkomponenten, der Gradienten- und der Streukraft. Die Streukraft wird in der Regel mit zwei verschiedenen Modellen beschrieben. Je nach Partikelgröße wird entweder die sog. Rayleigh- oder die Mie-Streuung angenommen. Das Rayleigh-Regime wird verwendet wenn Partikel, die kleiner als die verwendete Wellenlänge sind, betrachtet werden, wogegen das Mie-Regime bei Partikeln größer als die Wellenlänge angewandt wird. In den hier

durchgeführten Arbeiten wurden immer Partikel, die größer als die Wellenlänge des Lasers (1070 nm) sind, verwendet. Somit kann die Wechselwirkung mit der elektromagnetischen Feldverteilung auf Basis der aus der Literatur bekannten Wechselwirkungsgleichungen für die Mie-Streuung beschrieben werden. Am Beispiel eines Teilchens, das im Fokus einer optischen Pinzette eingefangen werden soll, lassen sich diese Kräfte gut erklären. Die Streukraft ist die Kraft, die ein Partikel in Ausbreitungsrichtung des Lasers von seiner aktuellen Position aus in Ausbreitungsrichtung wegbewegt. Ursache hierfür sind die an der Oberfläche reflektierten Photonen und der sich daraus ergebende Impulsübertrag auf das Teilchen. Im Gegensatz zur Streukraft bewirkt die als Gradientenkraft bezeichnete Kraftkomponente auf die Mikropartikel, dass sie zum einen, bedingt durch das Gaußprofil des Laserstrahls, auf die Achse des Strahls gezogen werden. Anderseits, bildet sich, wenn der Einfallswinkel groß genug ist, eine Kraftkomponente aus, die entgegengesetzt der Lichtausbreitungsrichtung orientiert ist. Falls diese Gradientenkraft die Streukraft überwiegt kann das Teilchen in einem elektromagnetischen Feld dreidimensional einfangen werden. Diese Wechselwirkung gilt allerdings nur für Partikel, deren Brechzahl größer als die des umgebenden Mediums ist und die für die einfallende Strahlung optisch transparent sind. In Abhängigkeit von Größe und Material der Partikel bzw. der Wellenlänge des Lasers oder der Numerischen Apertur der Optik kann die Kraft auf die Partikel berechnet werden. Für die Berechnung der Flusseigenschaften ist es deshalb notwendig die genauen Feldverteilungen zu berechnen. Diesbezüglich wurde ein Simulationstool, in dem verschiedene Methoden (Beam-Propagationmethode (BPM), Wave-Propagationmethode (WPM) und Fresnelausbreitung) zur Simulation beugungsoptischer Bauelemente implementiert wurden, erstellt. Als Beispiel ist in Abb. 26 die Simulation des Talboteffekts, wie oben diskutiert, dargestellt.

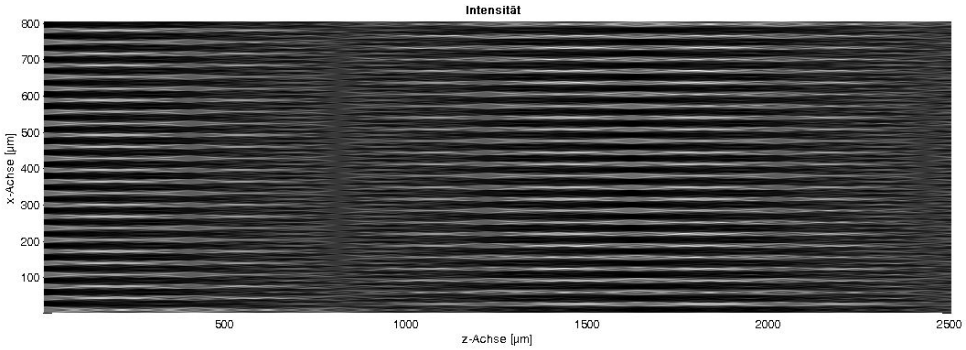


Abb. 26: Ergebnis der berechneten Fresnelausbreitung am Beispiel des Talboteffekts

Weiterhin wurden Konzepte für die Kombination optischer, elektrischer und magnetischer Wirkprinzipien untersucht um mögliche neue Anwendungsfelder zu erschließen. Als besonders interessante Krafterzeugungsprinzipien in Verbindung mit einer optischen Pinzette und integrierten mikro-opto-fluidischen Mikrosystemen haben sich dabei die Kraftentwicklung im elektrischen und im magnetischen Feld, die Dielektrophorese sowie die Verwendung von Ultraschallfeldern herausgestellt.
Diese theoretischen Betrachtungen bilden die Grundlage für weiterführende Konzepte zur Integration komplexer Mikrosysteme zur Kombination verschiedener Wirkprinzipien zur Mikromanipulation. Diese können zur Optimierung der Kraftwir-

kung in mikrofluidischen Systemen dienen, konnten aber im Rahmen des einjährigen Projektes noch nicht in Demonstratoren umgesetzt werden.

C) BIOFACE

Im Teilprojekt BIOFACE wird eine ionenselektive Oberflächenfunktionalisierung mittels extrem dünner, poröser Glasschichten (Siliciumalkoxid Sol-Gele) angestrebt, wobei die Vorzüge des Gruppe-III-V-Substrates (AlGaN/GaN-Heterostruktur) wie optische Transparenz, chemische, elektrische, mechanische und Langzeitstabilität erhalten bleiben. Gläser, die sich ohne Schmelze bei Raumtemperatur ausschließlich aus Hydrolyse- und Kondensationsreaktionen zwischen molekularen Precursoren und Wasser bilden, umgehen bei der Funktionalisierung der Oberfläche hohe Temperatureinträge, sowie elektrische Felder, die insbesondere das zweidimensionales Elektronengas (2DEG) der AlGaN/GaN-Sensoren negativ beeinflussen können. Eine Evaluierung in Frage kommender Precursoren für das Arbeitspaket C1 veranlasste die Behandlung der Zielstellung in diesem Projektzeitrahmen mit dem Sol-Ausgangsmaterial Tetraethylorthosilicat (TEOS) zur Bildung von Siliciumoxid-Netzwerken. Da die systematische Herstellung von Solen verschiedenster Mischungsverhältnisse zwischen TEOS, Wasser, Alkohol und einem Katalysator in der Literatur kaum beschrieben ist, wird über einen entsprechend erstellten Versuchsplan eine gezielte Modifizierung der Schichteigenschaften für unterschiedliche Eigenschaften, wie einer porösen, ionenfangenden Matrix untersucht. Zu diesem Zweck wurde über einen kombinatorisch-chemischen Ansatz die Möglichkeit geschaffen, einen weitgespannten Fächer an Sol-Gel Ausgangsmischungen zu erzeugen, welche dann zu Gläsern weiter prozessiert und charakterisiert werden können.

Sol-Gele sind seit vielen Jahrzehnten bekannt und dienen unter anderem zur Herstellung von Aerogelen (geschäumt). Die zugrunde liegenden Sol-Gel-Mischungen für derartige Gläser (geschäumt im Fall von Aerogelen oder ungeschäumt im vorliegenden Projekt) unterliegen im Rahmen ihrer Herstellung verschiedenen Bedingungen, über deren Variation Gläser mit unterschiedlichen Charakteristiken erzeugt werden. Hauptsächliche Eigenschaft soll eine nanoporige Struktur sein, welche die Möglichkeit bietet Ionen unterschiedlicher Größe aufzunehmen und wieder abzugeben.

Die kombinatorische Chemie ist eine vergleichsweise junge Disziplin der modernen, synthetisch organischen Chemie. Erste CombiChem taugliche Konzepte, bei denen es um die gleichzeitige Synthese von chemisch ähnlichen Verbindungen geht, wurden Mitte bis Ende der 80er Jahre entwickelt. Seit dieser Zeit befindet sich dieser Zweig der Chemie in einer stürmischen Weiterentwicklung und kommt hauptsächlich in der medizinisch-pharmazeutischen Chemie zum Einsatz. Um aus einer überschaubaren Menge von Grundbestandteilen eine große Zahl von Syntheseprodukten zu erzeugen, eine sogenannte chemische Bibliothek benötigt man die kombinatorische Chemie. Eine Substanzbibliothek kann dabei aus Verbindungsgemischen oder aus einer Ansammlung von Einzelverbindungen bestehen. Statt zweier Edukte A und B, welche zu einem Produkt AB reagieren, werden mehrere Edukte A_1 bis A_m und B_1 bis B_n miteinander zur Reaktion gebracht (siehe Tabelle 1).

A_1		B_1		A_1B_1, A_2B_1, A_3B_1 ... A_mB_1
A_2		B_2		A_1B_2, A_2B_2, A_3B_2 ... A_mB_2
A_3		B_3		A_1B_3, A_2B_3, A_3B_3 ... A_mB_3
A_4	+	B_4	→	A_1B_4, A_2B_4, A_3B_4 ... A_mB_4
A_5		B_5		A_1B_5, A_2B_5, A_3B_5 ... A_mB_5
...		...		...
A_m		B_n		A_1B_n, A_2B_n, A_3B_n ... A_mB_n

Tabelle 1: Formales Schema einer kombinatorischen Verknüpfung

In dem in Abbildung 27 dargestellten Syntheseschema reagieren sechs Verbindungen (Halogenide und Alkohole) zu 9 (3 × 3) verschiedenen Ethern. Halogenide reagieren relativ schnell im Sinne einer S_N2 Reaktion (Nucleophile Substitution) mit Alkoholen zu den entsprechenden Ethern. Geht man von jeweils tausend Substanzen aus, so hätte man nach einem Verknüpfungsschritt bereits eine Million neuer Substanzen synthetisiert.

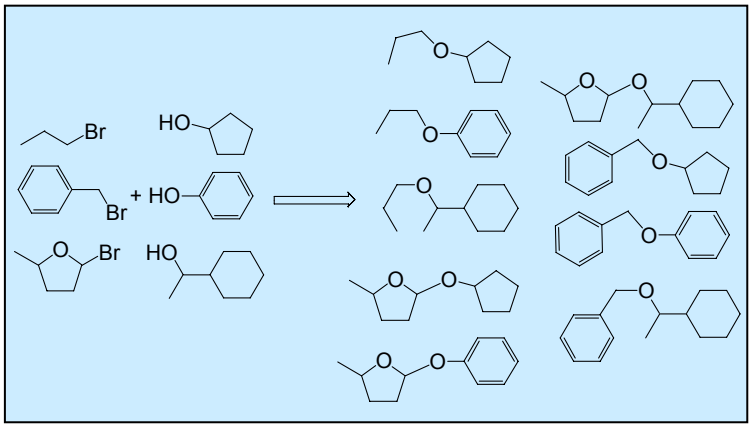


Abb. 27: Beispielsreaktion zur Erzeugung einer 3x3 Bibliothek verschiedener Ether

Im Fall der Sol-Gel Erzeugung haben wir eine sehr begrenzte Anzahl von Substanzen vorliegen. Die kombinatorische Chemie basiert hier auf einer Variation der Konzentrationen der Komponenten, sowie auf ihren Mischungsverhältnissen untereinander. Variierbar können auch die nach der Sol-Herstellung erfolgenden physikalischen Parameter sein. Bei der Temperung kann dies die Zeit der vorhergehenden Alterung des Sol-Gels sein, die Zeit und die Temperatur des Temperprozesses sowie verschiedene Temperatur-Zeit Profile. Bei der Variation der Mischungsparameter ist zu beachten, dass bestimmte Mischungsverhältnisse aufgrund von Löslichkeitsproblemen nicht darstellbar sind (siehe Abbildung 28).

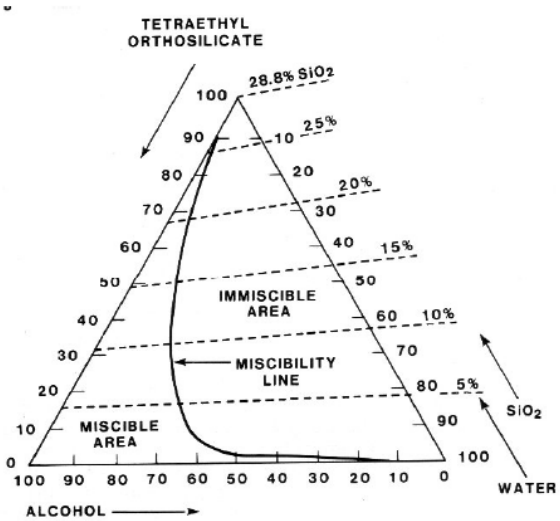


Abb. 28: Ternäres Phasendiagramm bei 25°C TEOS-Ethanol-Wasser (Brinker, 1990)

Die hohe Reinheit der Ausgangssubstanzen ist weitere wichtige Voraussetzung für die Funktionalisierung von AlGaN/GaN-Sensoroberflächen durch Gläser. Weiterhin war es aufgrund der gewünschten Ionenselektivität der erzeugten Glasschichten notwendig, einen nicht konventionellen Zugang zu Sol-Gel-Mischungen zu finden, bei dem keine ubiquitären Kationen (z.B. Natrium oder Kalium) in der Mischung vorliegen. Dies war insbesondere bei der Wahl der Base wichtig. In den Mischungen wird anstatt der üblichen Alkalimetall-

hydroxide die starke organische Base Diisopropylethylamin verwendet. Um die Mischungsprobleme zu umgehen, wurden Stammlösungen der Einzelkomponenten hergestellt, die untereinander problemlos mischbar sind. Über ein Excel-Programm ist es nun möglich, Mischungen herzustellen, bei denen nachfolgende chemische Parameter in weiten Bereichen frei variiert werden können:

- Konzentration von Tetraethylorthosilikat (TEOS),
- Konzentration der Salzsäure,
- Konzentration der Base (Diisopropylethylamin),
- Verhältnis TEOS zu Wasser und
- Verhältnis Isopropanol zu Wasser.

Für die reproduzierbare Herstellung der dünnen Schichten ist ein Spin-Coater der Firma SSE Semiconductors angeschafft worden, der die Möglichkeit der gesättigten Atmosphäre und somit einer kontrollierten Verdunstung an enthaltenen Lösungsmitteln bietet. Bei Umdrehungszahlen bis 10.000 U/min, einem motorgesteuerten Einmalspritzen-Dosiersystem mit einer Auflösung bis 3 μl und einer Positioniergenauigkeit des Dispensers von 1 μm ist ein optimaler Parameterbereich zur Herstellung homogener Spin-on-Dünnschichten gegeben. Die Problemstellung der Kontaminationsfreiheit unter mehreren Hundert Materialmischungen wurde dahingehend gelöst, dass sämtliche in Berührung kommenden Behälter, wie Spritzen, Schläuche und Process-Bowls jederzeit und einfach austausch- und wegwerfbar gehalten sind. Spin-Coat-Einstellungen, sowie Temperungsparameter wurden an einem kommerziellen Referenz-Sol (der Firma FEW GmbH) mit nahezu gleichen chemischen Ausgangsstoffen evaluiert. Die Herstellung verschiedenster Sol-Gel-Schichten mit Dicken zwischen 50 nm und 250 nm gelang bisher auf Silicium- und Glas-Substraten. Damit wurden die Ziele des Arbeitspakets C1 erfüllt.

Die so hergestellten Dünnschichten (mehrere hundert) wurden optisch untersucht und charakterisiert, vielversprechende Mischungen verifiziert und weitergehend analysiert. Zur Charakterisierung dient die optische, elektrische und strukturelle Festkörperanalytik des Zentrums für Mikro- und Nanotechnologien.
Die Schichten sind beispielsweise auf folgende Anforderungen zu prüfen:

- Untergrundhaftung,
- mechanische Stabilität,
- optische Transparenz des Materials,
- Homogenität der Schicht,
- Schichtdicke,
- Brechnungsindex,
- Porösität der Oberfläche und der Schicht,
- Benetzbarkeit,
- biologische Verträglichkeit und
- Stöchiometrie.

Herr Dr. Michael Lang der NWFG NanoCap evaluierte Charakterisierungsmethoden mittels Ellipsometrie, Kernspinresonanzspektroskopie (NMR) und kalorimetrischer Methoden (Differential Scanning Calorimeter).
Für die Untersuchung des Sols stand am Institut für Physik für Tests die DSC (Differential Scanning Calorimetry)-Methode zur Verfügung, mit welcher die Differenz des Wärmestroms zur oder von der Probe und zu einer inerten Referenzsubstanz als Funktion der Temperatur oder Zeit gemessen wird. Die Probe wird dabei einem kontrollierten Temperaturprogramm unterworfen. Dabei ist das Downscaling

des Probenvolumens um das 100-fache gegenüber dem Ausgangssol in einem fest verschlossenen Aluminium-Tigel zu beachten, wodurch es zu geringeren Diffussionslängen und zu einem verschobenen Ergebnis gegenüber dem größeren Volumen kommen kann. Diese Messungen gaben Aufschluß über Reaktionsdauer und Haltbarkeit der Sole.

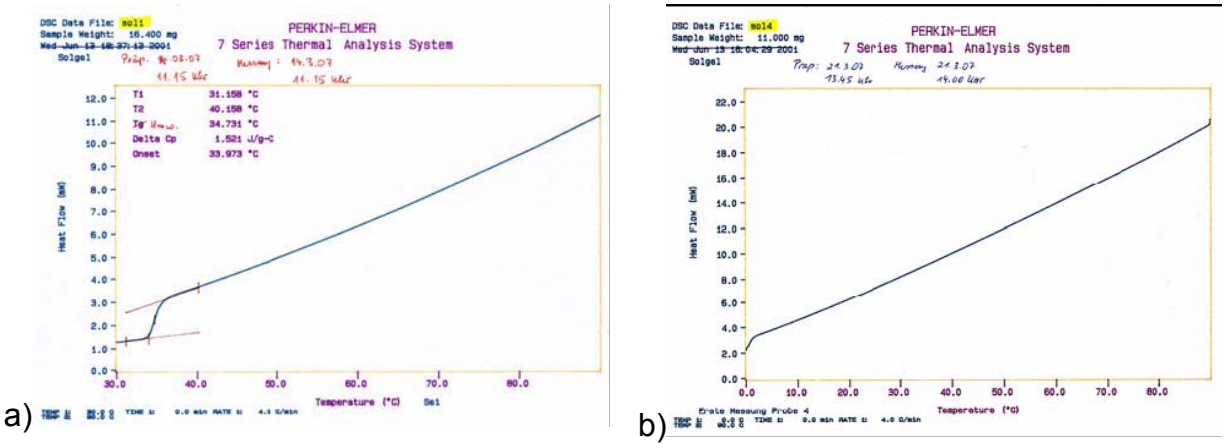


Abb. 29: DSC-Messung von 30°C auf 90°C einer a) frischen Lösung b) 7-Tage alten Lösung

Die Umwandlungstemperatur der Proben steigt demnach mit zunehmender Lagerdauer, nähert sich einem Maximalwert an, der circa 4°C über dem Anfangswert lag. Weitere Phasenumwandlungen finden um 90°C nach 1 bis 3 Tagen statt. Vor allem der Anstieg von $T_{umw.}$ zwischen Solen am ersten Tag und Solen nach einem Tag Lagerung bei Raumtemperatur ist groß. Daraus kann man schlussfolgern, dass innerhalb des ersten Tages die größte Veränderung der Lösung statt findet. Nach einer Woche ist mit Hilfe der DSC-Methode keine Umwandlung bis 90°C mehr festzustellen. Da aufgrund des sich bildenden Gasdrucks nur bis 90°C gemessen wurde ist nicht auszuschließen, dass bei höheren Temperaturen ein weiterer Phasenübergang stattfindet, was ein Hinweis auf die Bildung größerer Molekülketten wäre.

Die Reaktionszeiten spielten jedoch nicht nur bei den vollendeten Solen eine Rolle, sondern auch bei der Zugabe einer jeden einzelnen Komponente, so dass auch hierfür minutengenaue Zeitpläne erstellt wurden. Über diese konnten nun reproduzierbare Sole gewährleistet werden.

Um die Amorphität und somit die Glasähnlichkeit der getemperten Dünnschichten nachzuweisen, wurden Proben mittels XRD (X-ray Diffraction) untersucht. Sie wurden in Bragg-Brentano- (BB) und in Dünnschicht- (DSZ) Geometrie gemessen. Der Untergrund wurde nicht abgezogen. In BB-Geometrie tritt nur der Si{400}-Peak bei 69,231° 2-Theta und der verbotene Si{200}-Peak bei ca. 33° auf. Ein amorpher Glas-„Hügel“ („Buckel “) ist nicht zu finden, was wahrscheinlich am zu geringen Signal aufgrund der sehr geringen Schichtdicke lag. Daher wurden die Proben auch in DSZ-Geometrie bei einem festen Einstrahlwinkel von Theta 2° gemessen. Dadurch wird ein größeres Probenvolumen untersucht und eventuell auftretende Phasen eher gefunden. In allen drei Kurven ist im Bereich von ca. 18 bis 22° 2-Theta eine leichte Kurvenerhöhung zu detektieren, was als amorpher Glas-„Hügel“ bezeichnet werden kann. Weitere Beugungsreflexe stammen wiederum vom Si-Substrat.

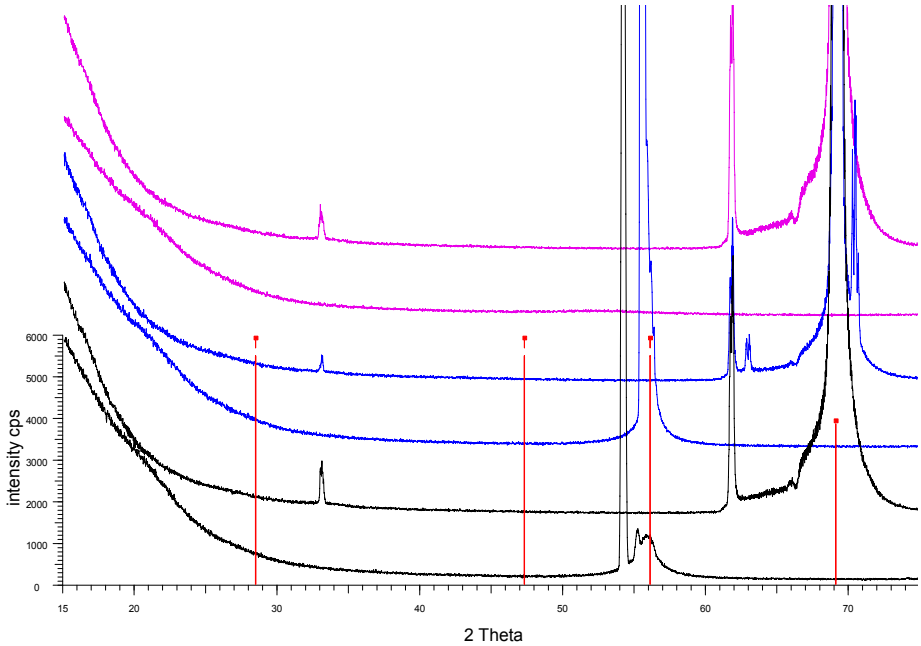


Abb. 30: Diffraktogramm der XRD-Analysen

Für die Untersuchung der Porosität ergab sich die Ellipsometrie als das am meisten geeignete Verfahren. Über den Brechnungsindex ist nach Bruggeman ein Rückschluß auf die Porosität möglich da

$$\pi \frac{(n_{Luft} - n_{mess})}{n_{Luft} + 2n_{mess}} + \rho \frac{(n_{SiO_2} - n_{mess})}{n_{SiO_2} + 2n_{mess}} = 0$$ wobei π als die Porosität mit $\pi = 1 - \rho$ ersetzt werden kann, bei der ρ die Dichte des Materials darstellt. Jede Brechzahl kleiner 1,45 könnte auf erhöhten Sauerstoffgehalt im SiO_2-Gefüge und damit Poren hinweisen. Am Institut für Physik wurden von Herrn Prof. Shokhovets weiterhin Messungen mit einem spektralen Ellipsometer durchgeführt. Anhand des Ein-Schicht-Modells bestätigten sie Brechzahl- und Schichtdickenmessungen mit dem Ellipsometer und ergaben zusätzlich aufgrund niedrigerer Brechungsindizes gegenüber reinem SiO_2 einen Porenanteil um 9%.

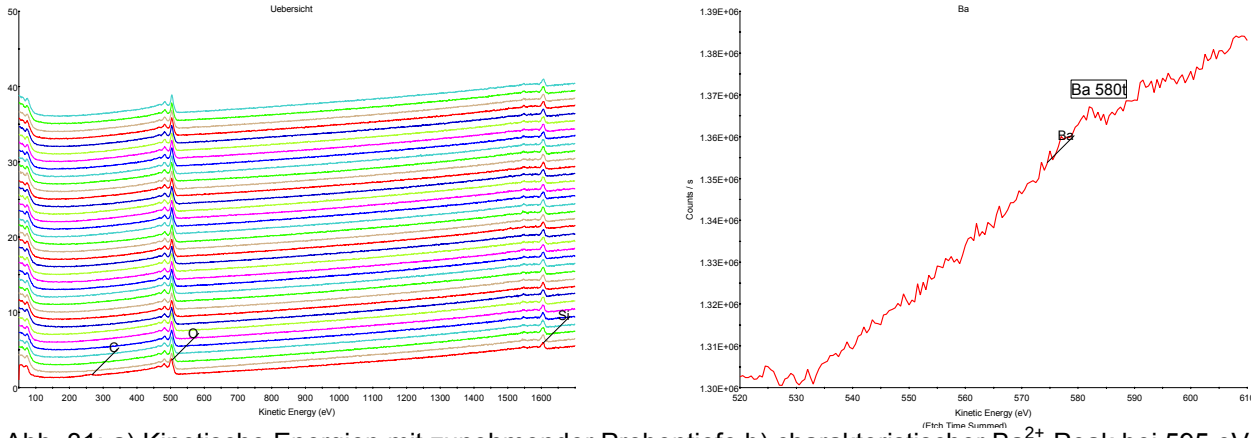


Abb. 31: a) Kinetische Energien mit zunehmender Probentiefe b) charakteristischer Ba^{2+}-Peak bei 595 eV

Ein Sol wurde zusätzlich für spektrale Ellipsometermessungen nach dem Tempern mit vier verschiedenen ionischen Lösungen behandelt. Die Brechungsindizes der

mit Mg^{2+}, Li^{+}, Ba^{2+} und Cs^{2+} behandelten Schichten unterschieden sich eindeutig von der unbehandelten, was ein Eindringen der Ionen naheliegen lässt. Um diese Ergebnisse zu verifizieren, wurden die Mg^{2+}- und Ba^{2+}- Proben mit AES (Auger-Elektronen-Spektroskopie) und gleichzeitiger Tiefenprofilierung untersucht. Dabei konnte für die Ba^{2+}-Probe der charakteristische Peak um 595 eV nachgewiesen werden.
XPS (X-ray Photoelectron Spectroscopy)- Messungen wiesen Mg^{2+}-Ionen an der Probe in einer methodenspezifischen Tiefe von 5 nm nach. Zusätzlich bestätigten sie die Stöchiometrie des Si_xO_y- Materials mit SiO_2. Die O- und Si-Peaks waren symmetrisch, was darauf hinweist, dass keine weiteren chemischen Bindungen zu den Elementen vorliegen.Weitere ellipsometrische Untersuchungen wurden für alle schichtbildenden Sole durchgeführt. Dabei wurden als Kernparameter der Schichtdicke der TEOS-Gehalt, sowie für den Brechungsindex der TEOS-Gehalt und das Isopropanol-zu-Wasser-Verhältnis an rund 150 vermessenen Proben herausgearbeitet. Folglich werden die Arbeiten an entsprechenden Mischungsverhältnissen intensiviert.
Ein hoher Sauerstoff-Gehalt in den Schichten, über den auf Porösität geschlossen werden kann, wurde außerdem über EDX (Energie Dispersive Röntgenspektroskopie) detektiert. Bild 32 zeigt den hohen O-Gehalt in einer Sol-Gel-Schicht im Vergleich zu reinem Kieselglas, wobei in Bild a) Si-counts des Si-Substrates hinzukommen. Die Eindringtiefe bei 5kV Beschleunigungsspannung beträgt circa 500 nm. Die Schichtdicke auf dem Si-Substrat hingegen nur 200 nm.

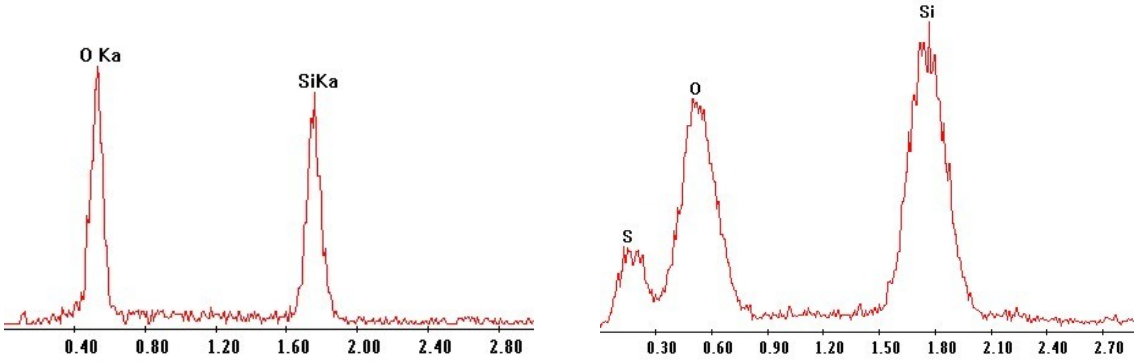
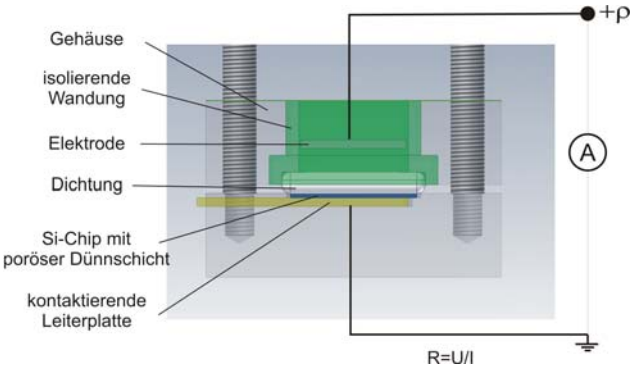


Abb. 32: EDX- Analysen von a) einer Sol-Gel-Schicht und b) reinem Kieselglas

Während Messungen der spektralen Ellipsometrie, XRD und XPS enorm zeitaufwendig sind, bietet die EDX-Analyse schnelle Ergebnisse, jedoch geringere Empfindlichkeit und eine höhere Eindingtiefe ins Substrat. Tapetests mit adhäsiven Folienstreifen, sowie Spülungen mit Lösungsmitteln bestätigen gute mechanische Eigenschaften der Schichten. Zellzählungen mit HEK293FT-Zellen bestätigen eine sehr gute Verträglichkeit gegenüber lebenden Materialien. Kontaktwinkelmessungen ergaben zusätzlich eine mittlere bis sehr gute Benetzbarkeit mit ionischen, wässrigen Lösungen. Sukzessive wurde ein Parameterbereich eingegrenzt, in welchem sich potentiell ionenselektive Schichten herstellen lassen können, womit Arbeitspaket C2 erfüllt wird.
Für Arbeitspaket C3 wurde die Integration der Dünnschichten in den Herstellungsprozess vorgesehen. Nach einer Reinigung der gewachsenen AlGaN/GaN-Substrate erfolgt die Metallisierung der Justiermarken, woraufhin Ätzungen für dann zu metallisierende Mesastrukturen vorgenommen werden. Nach deren Tem-

perung bei 800°C, einer Metallisierung für eine Bondverstärkung und deren Temperung bei 500°C wird eine Polyimid- Passivierung aufgetragen. Diese hält nach ihrer Strukturierung und Temperung bei bis zu 350°C weitere Temperatureinträge bis 450°C aus, was dem Wärmeeintrag auf Sol-Gel-Schichten entspricht.
Elektrische Messungen zeigten hochgradig isolierende Eigenschaften auf. Um ein Eindringen von Ionen bei möglicher Porosität nachzuweisen, wurde außerdem ein Aufbau konstruiert, über welchen eine sich ergebende elektrische Wiederstandsänderung detektiert werden kann. Damit wurden alle Voraussetzungen zur Erfüllung des Arbeitspaketes C4 geschaffen und damit das Projektziel erreicht.



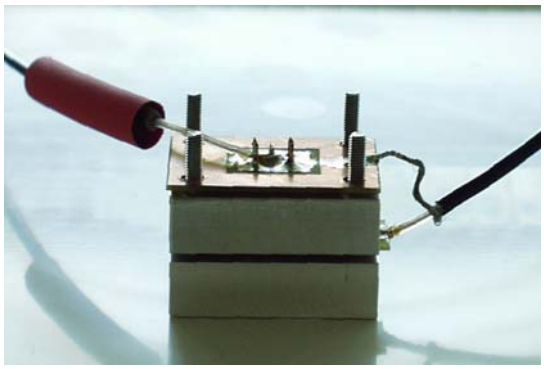


Abb. 33: a) Prinzipskizze b) Foto des fertigen Aufbaus

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises
Vergleich des Mittelverbrauchs mit der Kostenplanung

A) MIKROSPEK

Der Mittelverbrauch entsprach in dem einjährigen Projekt der Kostenplanung.

B) PHOTOFLUID

Es wurde eine Mittelumwidmung zur Beschaffung eines optischen Tisches und einer leistungsstarken Weißlichtquelle anstatt der beantragten Laserquelle durchgeführt. Weitere Mittel wurden im Wesentlichen wie geplant ausgeschöpft.

C) BIOFACE

Der Mittelverbrauch entsprach in dem einjährigen Projekt der Kostenplanung.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

A) MIKROSPEK

Die Arbeiten zielten auf die Erschließung der technologischen Grundlagen für die Herstellung von piezoelektrischen Dünnschichtsensoren. Dabei lag ein Schwerpunkt in der Entwicklung einer Technologie zur Herstellung der piezoelektrischen Dünnschichten aus AlN bei niedrigen Temperaturen, um eine künftige Prozessintegration mit CMOS-Komponenten zu ermöglichen. Darüber hinaus waren Prozesskonzepte für die Herstellung der komplexen Bauelemente zu entwickeln. Als Zielsystem war ein frequenzauflösender Schallsensor definiert worden.
Es konnten entscheidende technologische Grundlagen erschlossen werden. Für das angestrebte Zielsystem konnte auf der Ebene des FEM-Modells ein tragfähiger Ansatz entwickelt werden.
Aufgrund von technologischen Teilproblemen, die sich im Laufe der Projektbearbeitung zeigten, konnten nur ein einfaches Funktionsmuster eines Schallsensors realisiert werden. Für die Lösung der offenen Fragestellungen wurden Ansätze

erschlossen. Alle durchgeführten Arbeiten waren für die Erreichung des Projektzieles notwendig. Die im Laufe der Forschungsarbeiten aufgetreten neuen Fragestellungen werden in weiterführenden Projekten mit Partnern aus der Industrie bearbeitet.

B) PHOTOFLUID

Mit Hilfe der durch das BMBF bereit gestellten Mittel konnte an der TU Ilmenau eine optische Pinzette realisiert und auf den Einsatz in fluidischen Kanälen hin optimiert werden. Dies eröffnet nun die Möglichkeit dielektrische biologische Objekte in den fluidischen Kanälen in Ihrer Bewegung und Position zu kontrollieren. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die Nutzung fluidischer Mikrosysteme für biomedizinische Testsysteme. Die bereitgestellten Personal- und Sachmittel wurden für das Forschungsvorhaben angemessen eingesetzt und waren in der bewilligten Höhe notwendig für die erfolgreiche Erstellung der optischen Pinzette.

C) BIOFACE

Durch die bereitgestellten Mittel konnte am Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien (ZMN) der TU Ilmenau die Grundlage für Sol-Gel-Beschichtungen für vielfältige Anwendungen gelegt werden, die vorher nicht bestanden haben. Durch das Projekt können nun Sol-Gele als zukünftiges Sensormaterial – aber auch als nanoporöses Material, als glasigen Werkstoff, als Support für das Zellwachstum, sowie als Methode der Verbindungstechnik sowohl für weitere Forschungen als auch industriell nutzbar gemacht werden. Alle geplanten und durchgeführten Arbeiten sowie die benötigten finanziellen Mittel wurden dem Projekt zugeführt und waren für die erfolgreiche Bearbeitung notwendig.

4. Verwertbarkeit der Ergebnisse

A) MIKROSPEK

Auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse wurde der Kontakt zu Partnern aus Frankreich geknüpft, die neuen Ideen mündeten in einem Antrag im 7ten Rahmenprogramm der Europäischen Union. Weiterhin bilden die Arbeiten zu den piezoelektrischen AlN-Schichten eine Grundlage für einen DFG-Antrag mit dem Titel „Flimmerepithel“.

B) PHOTOFLUID

Die erzielten Ergebnisse sind perspektivisch von großer wirtschaftlicher Relevanz. Insbesondere die Integration optischer Teilfunktionalität in Mikrofluidikchips durch lithographische Herstellung oder mit Hilfe von Ultrapräzisionsbearbeitung erzeugten Strukturen stellt einen wichtigen Schritt in Richtung einer kommerziellen Verwertung dar. Dadurch wird es einerseits möglich durch eine Verbesserung der Schnittstellen zwischen mikrofluidischen Systemen für die Biotechnologie und Optik zur Charakterisierung und Manipulation die Handhabung bisheriger „lab-on-a-chip Systeme“ deutlich zu erleichtern. Andererseits kann mit Hilfe der mikro-optofludischen Systeme zusätzliche Funktionalität erreicht werden die die Nutzbarkeit deutlich vergrößert. Durch die Integration mit Hilfe konventioneller lithographischer Herstellungstechnologien und sich anschließender Replikation kann diese verbesserte Funktionalität ohne wesentliche Vergrößerung der Herstellungskosten erzielt werden.

C) BIOFACE

Der erzielte Fortschritt in der Methodik, der dazu notwendigen Geräteinvestitionen und die erzielten wissenschaftlichen Erfahrungen und Ergebnisse lassen eine vielfältige Nutzung auf dem Gebiet der Sensorik als auch auf verwandten Gebieten erwarten. Veröffentlichungen und Patentanmeldungen zu den im Projekt bearbeiteten bzw. im Anschluss durchgeführten Arbeiten sind zu erwarten. Kooperationsprojekte mit der Industrie als auch Grundlagenprojekte auf den beschriebenen Gebieten können nun leichter eingeworben werden.

Veröffentlichungen

A) MIKOSPEK

Piezoelectric properties of polycrystalline AlN thin films for MEMS application; K. Tonisch, V. Cimalla, Ch. Förster, H. Romanus, O. Ambacher, D. Dontsov, Sensors and Actuators A **132** (2006) 658.

Impact of silicon incorporation on the formation of structural defects in AlN; M. Hermann, F. Furtmayr, F.M. Morales, O. Ambacher, M. Stutzmann, and M. Eickhoff, J. Appl. Phys. **100** (2006) 113531.

Determination of strain and composition in SiC/Si and AlN/Si heterostructures by FTIR-ellipsometry; J. Pezoldt, Ch. Zgheib, V. Lebedev, P. Masri, O. Ambacher, Supperlattices and Microstructures **40** (2006) 612.

AlN as piezoelectric material for integrated micro and nano sensors on silicon; T. Polster, M. Hoffmann, A. Albrecht, K. Tonisch, O. Ambacher, Th. Stauden, M. Donauhe. St. Michael, Konferenzbeitrag zur SmartSystemsIntegration 2007

Aluminiumnitrid als piezoelektrisches Membranmaterial für MEMS; T. Polster, A. Albrecht, M. Hoffmann, St. Michael, Konferenzbeitrag zum MST Kongress 2007

B) PHOTOFLUID

S. Sinzinger, M. Amberg, H. Baitinger, *Integrierte Mikrooptik für mikrofluidische Systeme*, in Opt. Lett. in Vorbereitung.

S. Sinzinger, M. Amberg, H. Baitinger, E. Eriksson, J. Enger, D. Hanstorp, *Integrated Micro-Optics for Microfluidic Systems*, EOS Annual Meeting, Paris, 16.10.-19.10.2006.

S. Sinzinger, M. Amberg, H. Baitinger, E Eriksson, J. Enger M. Goksör und D. Hanstorp, *Integrated Micro-Optics for Microfluidic Systems*, 13. Heiligenstädter Kolloquium, „Technische Systeme für Biotechnologie und Umwelt“, 25.9-27.9.2006.

M. Amberg, H. Baitinger, S. Sinzinger, J. Enger, E. Errikson, M. Goksör und D. Hanstrop*, Integrierte Mikrooptik für mikrofluidische Systeme*, DGaO Jahrestagung Seebad Heringsdorf, 29.05-02.06.2007.

S. Sinzinger, M. Amberg, A. Oeder, D. Hein, C. Kremin, M. Hoffmann, J. Metze, A. Grodrian, *Integrated Micro-opto-fluidic Systems for Analytics and Manipulation in Cell Cultures*, Latsis workshop, Lausanne, 25.-27.Juni 2007.

S. Sinzinger, M. Amberg, A. Oeder, und D. Hein, *Integrated Micro-opto-fluidic Systems for Optical Manipulation of Cell Cultures*, OSA Annual Meeting, Frontiers in Optics, San Jose, CA. USA, 16.9.-20.9.2007.

C) BIOFACE

Combinatorial Chemistry approach for preparation of sol-gel materials in preparation for Journal „Chemistry of Materials

Characterisation and preparation of sol-gel thin layers: potential application for biosensor fabrication in preparation for “Micro & Nanoletters”

5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

A) MIKROSPEK: nicht bekannt

B) PHOTOFLUID: Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten auf verwandten Gebieten bestätigen die große wissenschaftliche und kommerzielle Relevanz des Themas. Das Thema „Optofluidik“ (z.B. D. Psaltis et.al. „Developing optifluidic technology through the fusion of microfluidics and optics“ Nature 442, p. 381-386 (2006)) ist insbesondere im anglo-amerikanischen Raum in den vergangenen Jahren zu einem zentralen Forschungsschwerpunkt geworden.

C) BIOFACE: nicht bekannt

III. Kurzgefasster Erfolgskontrollbericht

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen Rahmenprogramm

Das Projekt InnoSens ordnet sich thematisch in das Rahmenprogramm Mikrosystemtechnik 2004-2009 ein. Durch grundlegende Untersuchungen zu funktionalen Mikrostrukturen für innovative Sensorkonzepte wurde die interdisziplinäre Kompetenz am Wissenschaftsstandort Ilmenau gestärkt, die Wettbewerbsfähigkeit nicht nur im nationalen sondern auch im internationalen Maßstab durch Innovationen aktiv gesichert und damit ein Beitrag zur Konsolidierung der Beschäftigungssituation geleistet. Insbesondere die Bereiche Mikromechanische Systeme, Nano-Mikro-Integration sowie Mikrofluidik wurden in diesem Forschungsprojekt durch die breite Forschungsbasis mit den drei Forschungsschwerpunkten abgebildet. Der Systemgedanke spielte dabei eine zunehmend wichtigere Rolle in der nachhaltigen Entwicklung. Das genutzte bionische Konzept der akustischen mikromechanischen Spektrum-Analysatoren reflektiert ebenso auf diesen Ansatz, wie die Integration von optischen Werkzeugen zur Partikelmanipulation durch fokussiertes Licht. Funktionale ionensensitive Schichten schlagen die Brücke neuartiger Sensorsysteme auf AlGaN/GaN-Basis zu biologischen Anwendungen.

Durch die frühzeitige Integration von Studenten und deren adäquate Aus- und Weiterbildung am Forschungsobjekt mit deutlicher Perspektive zur unmittelbaren Anwendung wurde eine erforderliche Wissensbasis auch für weitere Innovationen erzielt. Eine nachhaltige Zukunftssicherung durch beantragte und bereits bewilligte Projekte garantiert den Ausbau des Know-hows zukünftiger Forscher und Entwickler in Hochtechnologiebereichen am Standort Ilmenau und darüber hinaus.

2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis

A) MIKROSPEK: Für eine Überprüfung der Übertragbarkeit des bionischen Prinzips der akustoelektronischen Signalwandlung für die Schallerkennung und Analyse auf technische Lösungen wurden die folgende Projektaufgaben bearbeitet und gelöst:

- Aufklärung des Zusammenhanges zwischen Abscheidbedingungen, Textur, piezoelektrischen Eigenschaften und mechanischen Zustand (Festigkeit, Stress) von AlN-Dünnschichten zur Energie- und Signalwandlung,
- Entwicklung und Evaluierung von effizienten Verfahren zur Herstellung und Strukturierung eines geeigneten Membranmaterialsystems auf der Basis von AlN, welches hinreichend große mechanische Festigkeit und piezoelektrische Koeffizienten und Kopplungskoeffizienten besitzt,
- Simulation einer flexiblen piezoelektrischen Membran zur Evaluierung von Prozesseinflussfaktoren und zur Auslegung ihrer Formgebung, um das gewünschten ortsaufgelöste Resonanzverhalten zu erzielen, sowie für die durch die Auflösung der Fotolithographie limitierte Elektrodengestaltung,
- Erarbeitung eines Herstellungsverfahrens für großflächige Membranen mit komplexen Geometrien und multiplen Resonanzfrequenzen,
- Systemkonzept und Test von unterschiedlichen Membransystemen, Auslesestrukturen und -mechanismen.

B) PHOTOFLUID: Zur Realisierung der optischen Pinzette zur Bewegungs- und Positionskontrolle von dielektrischen biologischen Objekten wurden die folgenden Arbeiten durchgeführt:

- Aufbau eines Versuchstands optische Pinzette;
- Demonstration der dreidimensionalen Manipulation von Mikropartikeln mit der optischen Pinzette;
- Berechnung von strahlformenden Elementen mittels verschiedener Algorithmen (z.B. mit Hilfe eines optimierten iterativen Fouriertransformationsalgorithmus);
- Herstellung diffraktiver Bauelemente in Silizium als Master für die Abformung (z.B.: achtstufiger Siliziummaster);
- Abformung der Siliziummaster in PDMS und Charakterisierung
- Integration optischer Strahlteilergitter in fluidische Mikrosysteme aus PDMS;
- Integration abgeformter beugungsoptischer Strukturen als Sandwichelemente (PDMS Gitter zwischen 2 Deckgläsern) in die optische Pinzette zur parallelen dreidimensionalen Manipulation mehrerer Mikropartikeln in unterschiedlichen Beugungsordnungen;
- Untersuchungen zur holographischen Erzeugung von benötigten Feldverteilungen durch
    - generalisiertes Phasenkontrastverfahren (GPC),
    - Selbstabbildungseffekt (Talboteffekt) und
    - Besselbeams;
- Aufbau eines counterpropagating Systems in Kombination mit einem GPC System zur Erzeugung dreidimensionaler Feldverteilungen;
- Ablenkung von Teilchen in einem fluidischen System um 20° zur Bewegungsrichtung mit Hilfe eines integrierten Vielfachstrahlteilers;
- Ablenkung von Teilchen in einem fluidischen System um 35° zur Bewegungsrichtung durch Anwendung des Selbstabbildungseffekts;
- Erstellung eines Simulationstools zur Berechnung von Feldverteilungen mit dessen Hilfe die Wechselwirkung von Partikeln in einem mikrofluidischen Kanal mit einer elektromagnetischen Feldverteilung bestimmt werden kann;
- Untersuchung von möglichen Kombinationsmöglichkeiten zur Erzeugung von Kräften auf Mikropartikel mittels elektrischer oder magnetischer Kräfte bzw. durch die Anwendung von Ultraschall;
- Entwicklung eines Konzeptes zum Einsatz integrierter optischer Funktionalität zur Mikromanipulation in „segmented flow“ Mikrochips für die Bioanalytik.

C) BIOFACE: Durch die Modifikation der AlGaN/GaN-Sensoroberflächen durch „spin on glas“ wurden ionenselektive Schichten zur Charakterisierung von Zellen hergestellt, die zum einen die Störkomponenten zurückhalten und die zu selektierenden Ionen in der Schicht anreichern. Selektionskriterien sind z.B. die hydrophobe Wechselwirkung, Größe oder Ladung der Ionen. Für eine Prüfung der Umsetzbarkeit dieser Zielstellung waren folgende Arbeitschritte nötig:

- Evaluierung verschiedener Sol-Gel-Ausgangsmaterialien,
- Modifizierung mit verschiedenen Additiven,
- Herstellung von Schichten,

- chemische und mechanische Charakterisierung der Schichten,
- Integration in das Sensorsystem sowie
- Test und Messungen der gefertigten Sensoren mit der funktionalen Schicht.

Die Vorteile solcher Schichten liegen darin, an ein neuartiges, arrayfähiges Sensorprinzip gekoppelt werden zu können. Die dabei erfolgende Miniaturisierung der Detektion bietet den Rahmen für den Einsatz in High-Throughput-Verfahren. Die optionale Kopplung der amperometrischen Messung an eine optische Messung ist bisher einmalig. Die trotz Funktionalisierung erhalten bleibende chemische Resistenz der Sensoren wird den Einsatz auch in aggressiveren Medien erlauben. Die Nutzung der Spin-on-Gläser für funktionale Beschichtungen auf mikrofluidischen und –sensorischen Systemen birgt nicht nur die Chance der Erschließung eines weiteren Einsatzgebietes dieser vielseitigen chemischen Gruppe, sondern kann auch bereits genannte andere Technologiegebiete vervollständigen und wird für weitere Forschungsaktivitäten und industrielle Nutzung am ZMN weiter entwickelt.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans

- Erfindungen

Im Laufe des Projekts sind bis zum 31.05.07 keine Schutzrechtsanmeldungen vorgenommen bzw. Schutzrechte erteilt worden.

- Wirtschaftliche und wissenschaftliche Erfolgsaussichten

Wesentliches Ziel des beantragten Projektes war die Beantwortung grundlegender Fragestellungen zur Anwendung spezieller funktionaler Mikrostrukturen in innovativen Sensorkonzepten. Durch die intensive interdisziplinäre Zusammenarbeit am Institut für Mikro- und Nanotechnologien und die sehr gute technologische Ausstattung im Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien waren die Voraussetzungen für eine kompetente und erfolgreiche Bearbeitung der gestellten Aufgaben gegeben.

Bei der Entwicklung von funktionalen piezoelektrischen Membranen für mikromechanische akustische Spektrum-Analysatoren ermöglichten die gewonnen Erfahrungen mit Gruppe-III-Nitriden eine erfolgreiche Entwicklung von Membransystemen mit definierten mechanischen Merkmalen. Die notwendige Systemintegration wurde auf der Basis umfangreicher Erfahrungen und Vorarbeiten zur Siliziummikromechanik sowie Aufbau- und Verbindungstechnologie vorbereitet. Die für weiterführende Entwicklungen notwendige Beherrschung des Struktur-Funktions-Zusammenhangs bis auf die Systemebene wurde durch die konsequente Einbeziehung der Modellbildung und Simulation bereits in der Phase der Materialoptimierung erreicht. Es stehen am Ende des Teilprojekts MIKROSPEK AlN-Membranen mit kontrollierbaren Design zur Realisierung von Frequenzanalysatoren für akustische Schwingungen zur Verfügung, die in einem weiterführenden Projekt zur Demonstration von robusten Schwingungsanalysatoren oder piezoelektrischen Mikrophonen eingesetzt werden.

Zum Zell-Handling in mikrofluidischen Systemen mit dynamische photonischen Kanälen wurden wissenschaftliche Fragestellungen untersucht, die das Spektrum der Möglichkeiten der Beeinflussung von Mikropartikeln mit Hilfe elektromagnetischer Strahlung deutlich erweitern. Trotz der bereits heute großen Verbreitung optischer Mikromanipulationstechniken in der Biotechnologie und Medizin ist das Spektrum der Anwendungen diesbezüglich bei weitem noch nicht ausgeschöpft.

Insbesondere eröffnet auch die weiterentwickelte Infrastruktur im Bereich der Lasertechnik, Mikrofluidik und der mikrostrukturierten Optik eine neue Anwendungsvielfalt. Die Chancen bei den wissenschaftlich-technischen Untersuchungen auf neue Möglichkeiten zur Beeinflussung von Mikropartikeln in mikrofluidischen Systemen zu stoßen und diese in integrierten mikrofluidisch-optischen Mikrosystemen für die Biotechnologie umzusetzen, sind daher als sehr gut anzusehen. Trotz der Grundlagenorientierung können auch die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten als gut bezeichnet werden. Dabei spielt der enge Kontakt zur in Thüringen existierenden Industrie eine zentrale Rolle, der von dem verantwortlichen Fachgebiet „Technische Optik“ schon seit einigen Jahren gepflegt wird. Dieser gute Kontakt wird genutzt um eine schnelle Überführung der Forschungsergebnisse in Entwicklungsprojekte zu gewährleisten.

Das entwickelte „spin on glas“ Verfahren wird schon industriell angewendet: Auch sind Verfahren der Modifikation der Glaszusammensetzung teilweise schon etabliert. Da das Beschichtungsverfahren ohne hohe Temperatureinwirkung durchgeführt wird, ist abzusehen dass die Funktionsfähigkeit des AlGaN/GaN-Sensors gewährleistet bleibt. Die große Variationsbreite der SOG-Verfahren ermöglicht Mdoifikationen, die zu einer Ionenselektivität führen. Zusätzlich ist eine Biofunktionalisierung (Hydrophobisierung durch Silanisierung) erreicht. Mit Hilfe des etablierten Ansatzes ist ein neuer Weg in der Anwendung der besonders vorteilhaften AlGaN/GaN-Heterostruktursystemen für die Biosensorik beschritten. Gerade im Hochdurchsatzscreening (HTS) besteht Bedarf an Methoden, die die Messung verschiedenster biophysikalischer Parameter möglichst simultan erlauben. Die Anwendung elektrophysiologischer Methoden war bis jetzt u.a. auf Grund der mangelnden Miniaturisierbarkeit von z.B. elektronischen pH Metern begrenzt. Es ist zu erwarten, daß die Entwicklung von miniaturisierbaren, ionenselektiven Sensoren gerade in der Untersuchung von Zellsystemen im HTS und UHTS einen großen Anwendungsmarkt finden wird.

- **Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Die Erfassung und Analyse von akustischen und niederfrequenten Schwingungen durch ein quasikontinuierliches Signalerfassungssystem erlaubt neben der klassischen Vermessung eines Schwingungsspektrums, die akustische Musteranalyse. Dadurch wird die Erfassung und Verarbeitung komplizierter akustischer Signalformen parallelisiert. Aus diesem Sachverhalt heraus ergeben sich neben der Realisierung der angestrebten Frequenzanalyse und der akustischen Mustererkennung weitere Anwendungsgebiete. Im Fall der niederfrequenten Mustererkennung sind Anwendungen in der Medizintechnik für die Untersuchung von Hypertonie, Herzrhythmusstörungen und für vorbeugende medizinische Analyse möglich [1,2], ein weiteres Anwendungsfeld ergibt sich im Bereich der Sicherheitstechnik für die Spracherkennung. Für die Erschließung jedes dieser Anwendungsfelder ist die Entwicklung eines spezifischen Membran- und Signalerfassungssystems notwendig. Ergänzend dazu ist es notwendig anwendungsspezifische Softwaresysteme zu erarbeiten. Aus diesem Grund ist mit einem Entwicklungsaufwand von fünf Jahren bis zum Prototyp zu rechnen.

In der Prävention arbeitsbedingter Erkrankungen bilden heute zumeist Emissionsmessungen an Arbeitsplätzen die Bemessungsgrundlage für Schutzmaßnahmen. Hierfür bieten die zu entwickelnden Systemkonzepte Ansätze für adaptierbare Dosimeter. Systeme, die darüber hinaus in der Lage sind, auf Basis von phy-

siologisch adäquaten Immissionsmessungen eine auf das Individuum bezogene Prophylaxe zu betreiben, bieten deutlich erweiterte Anwendungsmöglichkeiten. So könnten beispielsweise miniaturisierte Gehörsonden mit einer integrierten aktiven piezoelektrischen Membran die simultane Schallgebung und Schallaufnahme (Provokationsanalytik) ermöglichen.
Es ist geplant die einschlägig interessierte Industrie im Thüringer Umfeld unmittelbar in weiterführende Arbeiten einzubinden. In diesem Zusammenhang bestehen intensive Kontakte mit z. T. bereits konkreten Plänen für Kooperationen auf den Gebieten der Biosensorik und Medizintechnik zu den Firmen Fresnel Optik (Herr Bitzer), Wahl-Optoparts, Triptis (Herr Dr. Fischer), Jenoptik (Herr Dr. Falkenstörfer und Herr Dr. Probst, Consultant, Esslingen) sowie AnalytikJena (Herr Dr. Weber), Aura Optik GmbH (Herr Dr. Kilper), dem Institut für Bioprozess- und Analysenmesstechnik e.V. (Herr Dr. Metze) und der CIS GmbH, Erfurt (Herr Dr. Starke). Aufgrund der Ausgangssituation bestehen gute Chancen nach Ablauf des Projektjs die Ergebnisse in einem 3-5 jährigen Folgeprojekt zur Marktreife weiterzuentwickeln. Teilergebnisse könnten deutlich kurzfristiger als funktionelle Erweiterungen in die Gesamtsysteme z.B. einiger der o.g. Firmen einfließen.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Ortsaufgelöste Frequenzselektion in einem Sensor nicht erreicht

Im Rahmen des Teilprojekts MIKROSPEK konnten Eigenschwingungen der realisierten AlN-membranen vermessen werden und auch die Wechselwirkung mit akustischem Schall nachgewiesen werden, jedoch steht ein Nachweis der Funktions als ein frequenzselektierendes Bauelement noch aus.
Die Arbeiten im Rahmen des Teilprojektes PHOTOFLUID wurden alle erfolgreich durchgeführt. Aufgrund der Kürze der Projektlaufzeit konnten die Versuche jedoch großteils nicht über das Stadium „proof of principle“ hinaus weitergeführt werden.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Ergebnisse wurden auf zwei Messen und Anwenderkonferenzen wie z.B. der Smart System Integration 2007 sowie im Rahmen des Mikrosystemtechnik Kongresses 2007 vorgestellt und sind dort auf reges Interesse gestoßen.

6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Der Ausgaben und Zeitplan konnte eingehalten werden. Lediglich im Teilprojekt PHOTOFLUID wurde eine Mittelumwidmung zur Beschaffung eines optischen Tisches und einer leistungsstarken Weißlichtquelle anstatt der beantragten Laserquelle vorgenommen.

IV. Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts des Schlussberichts

Im Projekt InnoSens wurden funktionale Mikrostrukturen mit einer Schlüsselstellung für innovative Sensorkonzepte in drei Schwerpunktbereichen untersucht:

- piezoelektrische Membranen für mikromechanische akustische Spektrum-Analysatoren,
- dynamische photonische Kanäle für das Zellhandling in der Biosensorik und
- Spin-on-Gläser als ionenselektive Schicht für AlGaN/GaN-basierende Sensoren.

Neue funktionale Elemente der Mikrotechnik geben entscheidende Impulse für die Entwicklung innovativer Sensorkonzepte. Es wurden drei Schwerpunktfelder identifiziert, in denen durch die Verfügbarkeit neuer Elemente ein essentieller Entwicklungssprung erwartet wird, der den Zugang zu neuen Anwendungsfeldern erschließt:

(i) Resonante Sensoren und technische Mikrofone werden gegenwärtig von kapazitiven Prinzipien dominiert. Für eine direkte spektrale Frequenzzerlegung sind diese Prinzipien durch die mit steigender Auslesedichte drastisch sinkende Auflösung nur sehr eingeschränkt geeignet.

(ii) Die Manipulation von Zellen und Zellorganellen mit optischen Pinzetten hat sich in der Biosensorik weitgehend etabliert. Durch mikrooptische Bauelemente zur Erzeugung von Intensitätsverteilungen werden neue Funktionsprinzipien und Integrationsansätze für fluidisch-optische Sensoren zugänglich.

(iii) Ionenselektive Sensoren bieten einen entscheidenden Zugang zur Untersuchung elektrischer Zellaktivitäten. Defizite bestehen hier vor allem bei geeigneten Funktionalisierungsschichten zur Selektivitätssteuerung.

Das Ziel des Projektes InnoSens bestand in der Durchführung grundlegender Untersuchungen zu neuen funktionalen Mikrostrukturen und deren prototypischer Umsetzung in innovative Sensorlösungen in drei Schwerpunktbereichen.

(i) Auf der Basis piezoelektrischer Membransysteme mit signifikant erweitertem Funktionsumfang wurde exemplarisch ein neuartiger akustischer Spektrum-Analysator entwickelt, der von Prinzipien biologischer Schallaufnehmer in Hörorganen inspiriert ist. Es wurden schwerpunktmäßig Membransysteme auf der Basis von AlN untersucht, die insbesondere unter dem Aspekt der Systemintegration und Prozesskompatibilität große Vorteile besitzen. Betrachtet wurden vor allem der Schichtaufbau, die prozessbestimmten Schichtparameter und Schichtspannungen sowie die Membrangeometrie unter dem Gesichtspunkt der Funktionsoptimierung und Technologieintegration. Die realisierten Membransysteme bieten über die fokussierte exemplarische Anwendung hinaus eine universelle Basis für resonante Sensoren und Schwingungsaufnehmer.

(ii) Für Anwendungen in fluidisch-optischen Sensoren wurde das Prinzip Manipulation von Mikroobjekten wie Zellen oder Proteinen mit optischen Pinzetten auf die Manipulation mit räumlichen elektromagnetischen Potentialstrukturen übertragen, die mit holografischen, beugungsoptischen und auch hybriden Bauelementen erzeugt werden. Dieser Ansatz soll neben komplexen Manipulationen auch das zentrale Problem der Zelladhäsion beim Zelltransport in Kanalsystemen adressieren. Hervorzuheben ist das funktionale Integrationspotential diffraktiver optischer Funktionselemente in die fluidischen Systeme, welches im Rahmen des Projekts evaluiert wurde.

(iii) Ausgehend von neuartigen universellen Sensoren auf AlGaN/GaN-Basis, die eine herausragende Empfindlichkeit bei der Detektion von Ladungen besitzen, wurden Untersuchungen zu ionenselektiven Schichtsystemen durchgeführt, deren

Transferverhalten und Oberflächenwechselwirkungen auf den Einsatz zur Analyse elektrischer Zellaktivitäten abgestimmt ist. Schwerpunkte waren Untersuchungen an Spin-on-Gläsern mit extrem geringer Dicke hinsichtlich der Transferaktivität, der Selektivität für ausgewählte Ionen und der Biokompatibilität. Ein wesentlicher Aspekt war auch die Testung der Langzeitstabilität der Glasschichen.

Mit den durchgeführten Arbeiten wurde ein Vorlauf für eine perspektivische Entwicklung von anwendungsorientierten Sensorlösungen z.B. für technische Mikrofone zur Schwingungsanalyse auch mit integrierter Schallanregung, für komplexe integrierte fluidisch-optische Systeme mit dreidimensionaler Lichtintensitätsverteilung und für neuartige ionensensitive Sensoren zur Untersuchung von Zell-Aktivitäten im Kontext der Medikamentenentwicklung in Kooperation mit industriellen Partnern geschaffen.

Ilmenau, den 27.10.07

Prof. Dr. Oliver Ambacher