Schlussbericht

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Technische Universität Ilmenau **IMN MacroNano®** **Fachgebiet Mikromechanische Systeme** **Gustav-Kirchhoff-Straße 7** **98693 Ilmenau**	**16SV5368** Datum: **9. Dezember 2013**

Vorhabensbezeichnung:

NanoMiPu

Virtuelle Membranaktoren auf Nanostrukturen in Mikro-Pumpen

Laufzeit des Vorhabens:

01.11.2010 bis 30.06.2013

Projektbearbeitung:

Dipl.-Ing. Lars Dittrich, M.Sc. Csaba Endrödy, PTA Annette Mörstedt,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Hoffmann

Teil 1 – Kurze Darstellungen

Aufgabenstellung

Ziel des Projekts ist eine Machbarkeitsstudie zu aktorischen Funktionen für flüssige Medien ohne bewegte Teile unter Nutzung von EWOD[1]-Effekten. Die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit, die sich auf Nanostrukturen befindet, bildet eine „virtuelle Membran“, die durch das Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen der Flüssigkeit und der dielektrisch isolierten, selbst aber elektrisch leitfähigen Nanostruktur ausgelenkt werden kann.

Zu diesem Zweck werden Strukturen auf der Basis von Silicium-Gras – einer DRIE[2]-Variante von *Black Silicon,* dem „RIE-Silicium-Gras“ – als nanoskalig strukturierte Oberfläche in einen mikrofluidischen Kanal integriert. Untersucht wird, wie sich durch einen Aufbau, der dem Prinzip des Electrowettings bzw. der Elektrokapillarität folgt, der Benetzungszustand des Fluids im Bereich der Nanostrukturen reversibel verändern lässt. Durch eine Kombination dieses Aufbaus mit (passiven) Ventilen wie z. B. Düsen/Diffusor-Mikroventilen kann eine Pumpe erzeugt werden, die vollständig ohne bewegliche Festkörperelemente auskommt.

Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Mikrosystemtechnische Pumpen stellen eine große technische Herausforderung in der Mikrofluidik dar. Rotatorische Pumpen, welche die makroskopischen Lösungen dominieren, sind aufgrund einer Vielzahl von Schwierigkeiten (z. B. Abrieb, Antrieb, Abdichtung, Oberflächenspannung der Fluide) weitgehend ungeeignet. Mikropumpen werden deshalb zumeist als komplexer Aufbau mit bewegten Festkörpermembranen realisiert, die über vergleichsweise leistungsstarke Antriebe bewegt werden müssen, wobei die Antriebe i. d. R. mittels serieller (manueller) Prozessschritte der Aufbau- und Verbindungstechnik mit dem mikrofluidischen Chip verbunden werden.

Nanostrukturen in Form von elektrisch leitfähigem Silicium-Gras können so gestaltet werden, dass sie isoliert und hydrophob sind. In diesem Fall tritt eine Flüssigkeit nur mit den Spitzen der Strukturen in Kontakt, während die Zwischenräume gasgefüllt bleiben[3]. Durch Anlegen einer elektrischen Spannung zwischen Flüssigkeit und dielektrisch isolierter Unterlage kann jedoch eine erzwungene (teilweise) Benetzung der ursprünglich hydrophoben Oberfläche erreicht werden, bei der das Medium durch elektrostatische Kräfte in die Zwischenräume hineingezogen wird. Dieser als *Electrowetting on Dielectrics*[4] (EWOD) für ebene, hydrophobe Flächen bekannte Effekt soll hier genutzt werden, um durch periodisches Anlegen einer Spannung das Flüssigkeitsvolumen im Bereich zwischen den Nanostrukturen (wie sich gezeigt hat, können diese Strukturen auch Abmessungen von einigen 10 Mikrometern erreichen) zu modulieren. Die Oberflächenspannung bildet dabei eine „virtuelle Membran“. Als „Membran“ wirkt damit die durch die Oberflächenspannung definierte Phasengrenzfläche der

[1] EWOD – Electrowetting on dielectrics
[2] DRIE – Deep reactive ion etching, dt. *tiefes reaktives Ionenätzen*
[3] A. B. D. Cassie and S. Baxter: Wettability of porous surfaces. In: Trans. Faraday Soc., 40:546–551, 1944
[4] Frieder Mugele and Jean-Christophe Baret: Electrowetting – from basics to applications. In: J. Phys.: Condens. Matter 17 R705, 2005

Flüssigkeit. Durch geeignete passive Ventilstrukturen kann dann ein gerichteter Volumenstrom und damit ein Pumpeffekt erzeugt werden.

Damit wird die Integration der neuartigen Pumpe in beliebige fluidische Mikrosysteme kosteneffizient möglich. Wichtige Forschungsaufgaben bis zu einer Anwendung sind neben Grundlagenuntersuchungen zu optimalen Strukturen auch die Herstellung von isolierten, hydrophoben Nanostrukturen im Mikrosystem und die Optimierung der Geometrie der Nanostrukturen, um einen möglichst großen Volumenhub bei kleiner Aktorspannung erreichen zu können, sowie die Beständigkeit der Nanostrukturen im Pumpbetrieb.

Für die Durchführung der Arbeiten standen an der TU Ilmenau mit dem Zentrum für Mikro- und Nanotechnologien alle notwendigen Prozesse einschließlich der Nanoanalytik zur Verfügung[5]. Das Fachgebiet Mikromechanische Systeme verfügt darüber hinaus über einen Messplatz für Electrowetting. Neu zu beschaffen war ein Netzteil, das regelbare, strombegrenzte eigensichere Wechselspannungen bis in den Bereich einiger 100 V erzeugen kann.

Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde auf eine Laufzeit von 24 Monaten ausgelegt. Bedingt durch die kurzfristige Bewilligung konnten im Jahr 2010 jedoch keine Arbeitsverträge mehr geschlossen werden. Die Arbeitsaufnahme erfolgte in der ersten Jahreshälfte 2011.

Zeitweise wurden weitere Kompetenzen insbesondere in der Analytik planmäßig hinzugezogen, die vom Fachgebiet Werkstoffe der Elektrotechnik eingebracht wurden. Die umfangreichen technologischen Prozesse mit entsprechenden Versuchs- und Messreihen wurden durch eine technische Mitarbeiterin wesentlich unterstützt. Damit entsprach die personelle Besetzung der in der Vorhabensbeschreibung vorgesehenen Ressourcenplanung.

Die Zeit- und Ausgabenplanung innerhalb des Projekts hat sich entsprechend der o. g. Verschiebung des Starts zeitlich verschoben. Durch die kostenneutrale Verlängerung des Bewilligungszeitraums und die Anpassung des Gesamtfinanzierungsplans blieb die ursprüngliche Arbeitsplanung auch in ihrer zeitlichen Abfolge davon unberührt.

Als zusätzliches Arbeitspaket wurde die Integration von Sub-Mikrometerstrukturen in die Pumpstrukturen definiert, die sich am Boden der Pumpstrukturen befinden sollen und dem Übergang in den WENZEL-Zustand[6] vorbeugen sollen. Sie werden daher so ausgelegt, dass sich auf ihnen ein zweiter CASSIE-BAXTER-Zustand auf einem niedrigeren energetischen Level einstellt. Dies wurde möglich und sinnvoll, weil das Pumpenkonzept auch mit mikrotechnisch realisierbaren Kavitäten mit bis zu 10 µm Kantenlänge arbeitet.

Die Arbeitspakete 7 und 8 wurden über den gesamten Zeitraum der Verlängerung ausgedehnt. Insbesondere im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik wurde durch ein Re-D cesign und ein überarbeitetes Technologiekonzept die hermetische Dichtigkeit der Chips sowie deren blasenfreie Befüllbarkeit verbessert.

[5] Eine Übersicht über die Infrastruktur findet sich unter www.tu-ilmenau.de/zmn

[6] Robert N. Wenzel: Resistance of solid surfaces to wetting by water. In: Industrial and Engineering Chemistry, 28:988–994, 1936

Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Pumpen gehören zu den wichtigsten Komponenten in fluidischen Systemen. Die bislang vorgeschlagenen Lösungen speziell für mikrofluidische Anwendungen sind Systeme, die sich ohne zusätzlichen Aufwand (z. B. Montageschritte, Aufbau- und Verbindungstechnik) nicht in den Prozessablauf zur Herstellung mikrofluidischer Systeme unter Verwendung von Standard-Technologieschritten integrieren lassen. Die für die meistverwendeten Aktorprinzipien notwendigen komplexen Aufbauten sind ein Nachteil existierender Lösungen, der bislang aufgrund der damit einhergehenden Kosten den Einsatz in Einweglösungen verhindert. Benötigt werden kostengünstige, einfach aufgebaute Komponenten, die möglichst ohne Sonderwerkstoffe (z. B. Piezokristalle, zusätzliche Arbeitsmedien) auskommen. Das zumeist verwendete Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) ist darüber hinaus bleihaltig und deshalb für Einwegprodukte ungeeignet.

Externe Pumpen bzw. Pumpen mit größeren Pumpenkammern führen darüber hinaus zu zusätzlichem Totvolumen im mikrofluidischen System. Deshalb ist es von besonderem Vorteil, wenn der Fluidkanal selbst als Pumpe genutzt werden kann, ohne weitere Totvolumina zu generieren. Insbesondere bei mobilen Geräten oder bei kostenintensiven Reagenzien besteht hier Bedarf. Ansätze wie thermische Blasenpumpen oder Ultraschall-Aktorik, die „im Kanal“ arbeiten, haben den Nachteil eines signifikanten Energieeintrags in das Medium, der für biologische Systeme oft nicht zulässig ist.

Die Entwicklung von Mikropumpen wird seit langem intensiv bearbeitet, zahlreiche Arbeiten wurden aufgrund der Bedeutung von Pumpen bereits in den 90er Jahren durchgeführt. Der größte Anteil an Arbeiten zu diesem Thema setzt auf Membran-basierte Pumpen, wahlweise mit aktiver oder passiver Ventilsteuerung. Als Antriebssysteme wurden bislang in überwiegender Mehrzahl Piezoantriebe, vereinzelt auch magnetische Antriebe eingesetzt. Verfahren mittels Dampfblasen (thermische Aktoren) oder Ultraschall wurden untersucht, weisen aber die o.g. Nachteile auf. Der Stand der Technik im Hinblick auf mögliche Aktorprinzipien und Aufbauten von Mikropumpen wird in mehreren Review-Artikeln[7,8] umfassend dargestellt.

Das Benetzungsverhalten bzw. der YOUNGsche Kontaktwinkel einer Flüssigkeit auf einer Festkörperoberfläche ist einerseits chemischen Ursprungs und stellt sich über das materialspezifische Verhältnis der Grenzflächenspannungen der drei beteiligten Phasen (fest, flüssig, gasförmig) ein. Es lassen sich zwei grundlegende Zustände der Flüssigkeitsgrenzfläche auf nanostrukturierten Oberflächen ausmachen, s. Abbildung 1:

a) Die Flüssigkeit füllt die Unebenheiten vollständig aus bzw. „folgt“ der Oberfläche.
b) Die Flüssigkeit benetzt nur einen Teil der erhabenen Strukturen, während darunter Hohlräume verbleiben, die mit dem umgebenden Gas bzw. Dampf gefüllt sind.

Diese fundamentale Beobachtung lässt sich im Szenario a) auf die Untersuchungen von Robert N. WENZEL zurückführen, weswegen dieser Zustand auch als *WENZEL-Zustand* bezeichnet wird. Zustand b) – der sogenannte *CASSIE-BAXTER-Zustand* – geht auf die Beobachtungen von CASSIE und BAXTER zurück (Abbildung 1).

[7] Laser, D. J., Santiago, J. G.: A review of micropumps, In: J. Micromech. Microeng., 2004, No. 14, pp. R35-R64
[8] Nguyen, Nam-Trung; Huang, Xiaoyang; Chuan, Toh Kok: MEMS-Micropumps: A Review, In: Transactions of the ASME, June 2002, Vol. 124, pp. 384-392

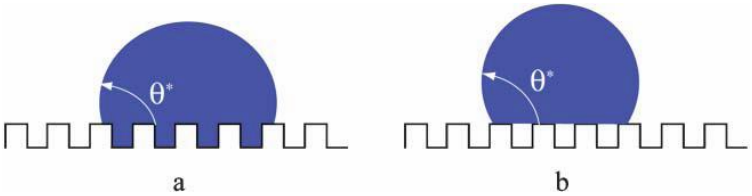

Abbildung 1: WENZEL-Zustand (a) und CASSIE-BAXTER-Zustand (b) eines Tropfens auf einer realen Festkörperoberfläche[9]

Im WENZEL-Zustand verursacht die Struktur der Festkörperoberfläche eine Vergrößerung der Oberfläche der Flüssigkeit und verstärkt so die Benetzungseigenschaften in die jeweilige Richtung. Im CASSIE-BAXTER-Zustand liegt der Tropfen nur auf einem Teil der erhabenen Festkörperstrukturen auf (vgl. Abbildung 1). Der effektive Kontaktwinkel ist dabei abhängig vom Verhältnis der Kontaktflächen jeweils zum Festkörper bzw. zum Gas. Um die beschriebenen Phänomene für einen fluidischen Aktor nutzbar machen zu können muss sich eine Flüssigkeit *reversibel* vom CASSIE-BAXTER- in den WENZEL-Zustand überführen lassen. Als mögliche Prinzipe für den Übergang vom CASSIE-BAXTER- in den WENZEL-Zustand werden in der Fachliteratur u. a. Temperaturfelder, Licht und elektrische Felder angeführt. Insbesondere wird der Electrowetting-Effekt explizit als vielversprechende Methode angeführt, um das Verhalten von Flüssigkeiten auf (superhydrophoben) Oberflächen *dynamisch* einstellen zu können. Abbildung 2 zeigt exemplarisch den Übergang zweier Flüssigkeiten in einem Electrowetting-Aufbau vom entnetzenden in den benetzenden Zustand.

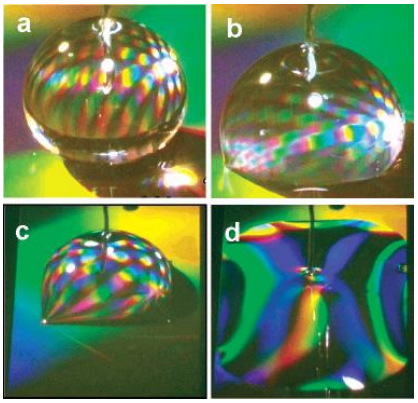

Abbildung 2: Elektrisch induzierter Übergang vom entnetzenden in den benetzenden Zustand eines Tropfens aus einer Salzlösung (a und b) bzw. von Zyklopentanol (c und d)[10]

Folgende Herangehensweise für die Realisierung des Electrowetting-Effekts auf nanostrukturierten, superhydrophoben Oberflächen wird in bekannten Ansätzen verfolgt: Durch das Ätzen nanoskaliger Säulen auf einem Substrat wird eine hydrophobe Oberfläche erzeugt; der Säulendurchmesser beträgt 350 nm, die Höhe der Säulen beträgt 7 µm. Der Rasterabstand der Säulen wird zwischen 1 und 4 µm variiert. Zur Erzeugung des typischen Electrowetting-Schichtaufbaus werden die Strukturen thermisch oxidiert und auf diese Weise mit einer elektrisch isolierenden Schicht versehen. Die entnet-

[9] Aus: Callies, Mathilde; Quéré, David: On water repellency, Review in: Journal of Soft Matter, 2005, No. 1, pp. 55-61

[10] Aus: Krupenkin, Tom N.; Taylor, J. Ashley; Schneider, Tobias M.; Yang, Shu: From Rolling Ball to Complete Wetting: The Dynamic Tuning of Liquids on Nanostructured Surfaces, In: Langmuir, 2004, Vol. 20, pp. 3824-3827

zenden Eigenschaften der Strukturen werden durch eine abgeschiedene Polymerschicht verstärkt. Die Flüssigkeit wird nun (z. B. über einen Platindraht) kontaktiert, das Substrat bildet die Gegenelektrode. Das Anlegen einer elektrischen Spannung führt nun gemäß der den Electrowetting-Effekt beschreibenden, fundamentalen YOUNG-LIPPMANN-Gleichung zu einer Kontaktwinkeländerung, die proportional zum Quadrat der elektrischen Spannung ist. Der durch Electrowetting induzierte Übergang vom CASSIE-BAXTER-Zustand in den WENZEL-Zustand wird in der Fachliteratur nachgewiesen und als „abrupter" Wechsel beschrieben. Um generell von einer *schaltbaren* Benetzung sprechen zu können, muss die Systemantwortzeit sehr gering sein – die Änderung des Benetzungsverhaltens muss sich *umgehend* einstellen. Der *reversible* Wechsel des Tropfenzustandes (d. h. insbesondere die Rückkehr in den CASSIE-BAXTER-Zustand) wird dabei als Herausforderung eingestuft.

Als Arbeitshypothese wurde formuliert, dass bereits eine reversible elektrostatische *Auslenkung* der virtuellen Membranen in die Oberflächenstrukturen hinein ausreicht, ohne dass der Übergang vom CASSIE-BAXTER- in den WENZEL-Zustand induziert wird.

Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens genutzt wurden

Die Durchführung des Vorhabens basierte auf den im Antrag dargestellten Vorarbeiten am Fachgebiet Mikromechanische Systeme. Nach bestem Wissen wurde ansonsten auf keine bekannten Konstruktionen, Verfahren oder Schutzrechte zurückgegriffen.

Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Zur Informationsbeschaffung und insbesondere im Rahmen der Literaturrecherche wurden die folgenden Informationsdienste bzw. Quellen verwendet:

- Datenbanken: Inspec, Web of Science, Scirus, Google Scholar
- Patentdatenbanken: DEPATISnet, Espacenet
- Normendatenbank: Perinorm
- Recherchesaal des PATON an der TU Ilmenau
- Standard-Lehrbücher der Mikrosystemtechnik
- Katalog und Datenbanken der Universitätsbibliothek der Technischen Universität Ilmenau

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Herstellung mikrofluidischer Chips stand die umfangreiche technologische Ausstattung des Zentrums für Mikro- und Nanotechnologien der TU Ilmenau zur Verfügung[11]. Die Mitarbeiter anderer Fachgebiete des Instituts für Mikro- und Nanotechnologien MacroNano®[12] standen jederzeit sowohl für den Erfahrungsaustausch als auch für fachliche Diskussionen zur Verfügung.

[11] www.tu-ilmenau.de/zmn
[12] www.tu-ilmenau.de/imn

Das Verfahren der internationalen Nachanmeldung wurde an einen universitätsexternen Patentanwalt übergeben. Die Thüringer Patentverwertungsagentur (PVA) im Landespatentzentrum PATON der TU Ilmenau unterstützt die weitere Verwertung der angestrebten Schutzrechte.

Teil 2 – Eingehende Darstellungen

Erzielte Ergebnisse

Das folgende Bild zeigt das Grundprinzip des Pumpenaufbaus im Sinne des Projektziels.

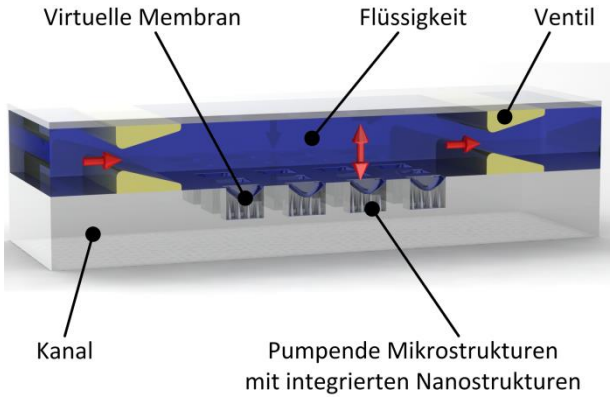

Abbildung 3: Vereinfachtes Pumpenmodell, hier mit einer Kombination aus Mikro- und Nanostrukturen

Technologische Vorarbeiten

Am Beginn der Arbeiten stand eine grundlegende Untersuchung, welche Schichtwerkstoffe sich für den Einsatz in der angestrebten Pumpe eignen. Der spätere Aufbau erforderte sowohl leitfähige (Elektroden) als auch isolierende Schichten (Dielektrika), die auf strukturierten Oberflächen aufzubringen waren. Dementsprechend waren Eigenschaften wie die Kantenbedeckung sowie die Schichtdickenhomogenität über die strukturierte Oberfläche hinweg zu optimieren. Die Material- und Prozessauswahl wurde gemäß Tabelle 1 getroffen. Für die Untersuchungen wurden geeignete Proben hergestellt. In Abstimmung mit dem Fachgebiet *Werkstoffe der Elektrotechnik* (FG WET) wurden langgestreckte Gräben mit einem Aspektverhältnis von ca. 1 als geeignete Strukturen für die Untersuchungen mittels FIB[13] und TEM[14] ermittelt. Eine entsprechende Chrommaske wurde entworfen und beschafft. Mit Blick auf einerseits die (erwarteten) typischen Abmessungen der späteren pumpenden Strukturen und andererseits auf den maximalen Bildausschnitt des TEM wurden Silicium-Wafer mit einem hochauflösendem UV-empfindlichen Lack (AZ® ECI 3027-0,7µm) beschichtet und lithografisch strukturiert. Die laterale Breite von Stegen und Gräben wurde von 1 µm bis 10 µm variiert (Abbildung 4). Es wurde ein Cryo-Prozess ($\vartheta \approx -100\,°\mathrm{C}$) für das reaktive Ionenätzen (*Plasmalab100, Oxford Instruments*) entwickelt, mit dem sich die Fotolackmaskierung anisotrop in das Siliciumsubstrat übertragen lässt (Abbildung 5). Diese Strukturen wurden mit den zu untersuchenden Materialien beschichtet (Tabelle 1) und anschließend an das Fachgebiet *Werkstoffe der Elektrotechnik* analysiert.

[13] Focused Ion Beam, dt. *fokussierter Ionenstrahl*
[14] Transmissions-Elektronenmikroskopie

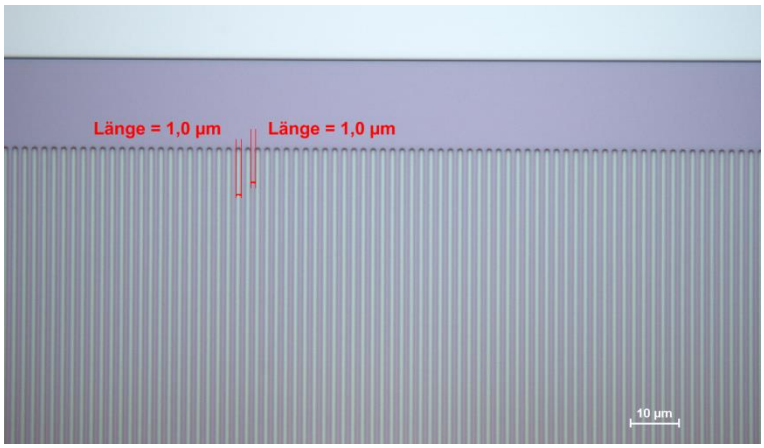

Abbildung 4: Hochauflösender Fotolack *AZ® ECI 3027* – 1µm-Gräben nach der UV-Lithografie als Maskierung

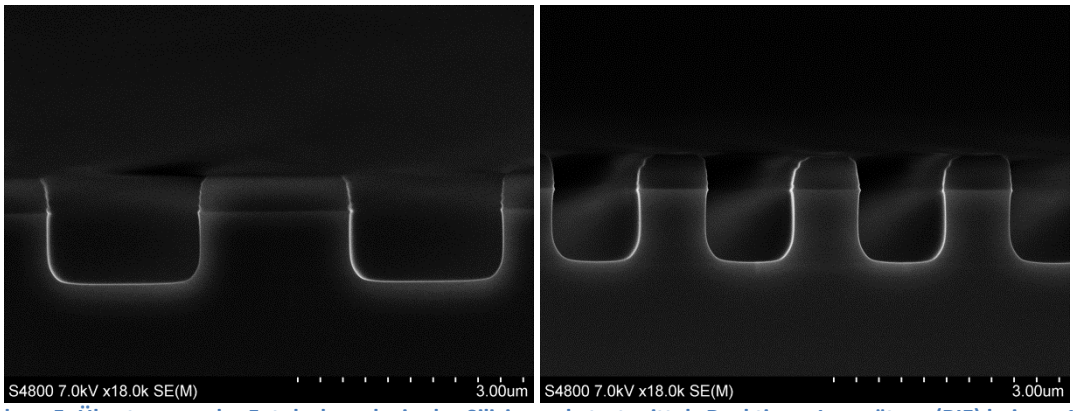

Abbildung 5: Übertragung der Fotolackmaske in das Siliciumsubstrat mittels Reaktivem Ionenätzen (RIE) bei ca. -100 °C

Tabelle 1: Untersuchte metallische und dielektrische Schichtwerkstoffe

	Werkstoff	Herstellungsverfahren
Metalle	Chrom (Cr)	Elektronenstrahlbedampfen
	Indium (In)	Elektronenstrahlbedampfen
	Platin (Pt)	Elektronenstrahlbedampfen
	Titan (Ti)	Elektronenstrahlbedampfen
	Titan (Ti)	Kathodenzerstäubung (Sputtern)
	Titan-Wolfram (TiW)	Kathodenzerstäubung (Sputtern)
	Platin (Pt)	Kathodenzerstäubung (Sputtern)
Dielektrika	Aluminiumnitrid (AlN)	Reaktives Sputtern
	Diamantartiger Kohlenstoff (engl. *diamond like carbon*, DLC)	Chemische Gasphasenabscheidung (PECVD)
	Siliciumnitrid (Si_3N_4)	Chemische Gasphasenabscheidung (ICPCVD)
	Siliciumnitrid (Si_3N_4)	Chemische Gasphasenabscheidung (PECVD)
	Siliciumnitrid (Si_3N_4)	Chemische Gasphasenabscheidung (LPCVD)
	Siliciumdioxid (SiO_2)	Chemische Gasphasenabscheidung (ICPCVD)

Die bereitgestellten Substrate wurden quer zu den Gräben geritzt und gebrochen, um geeignete Proben für die Analyse mittels FIB und TEM zu erhalten. Zur Stabilisierung der Proben bzw. zum Schutz der Oberfläche gegen den Ionenstrahl wurden die Proben zweistufig mit Platin beschichtet. Anschließend wurden in der Ionenstrahlanlage zwei Schnitte quer zu den Gräben durchgeführt, wodurch eine Lamelle entsteht, die für die TEM-Untersuchung geeignet ist. Direkt nach den Schnitten wurden Aufnahmen vom entstandenen Querschnitt gemacht, anhand derer eine Analyse der Kantenbedeckung

sowie der Schichtdickenhomogenität der Strukturen möglich ist. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen jeweils die Beschichtungen mit den besten Eigenschaften für Metalle (gesputtertes TiW) bzw. Dielektrika (LPCVD von Si_3N_4). Die genannten Prozesse lieferten Beschichtungen mit der besten Konformität und Kantenbedeckung. Anhand der Ergebnisse werden zeitnah einerseits die mittels TEM zu untersuchenden Proben zur Ermittlung weiterer Materialeigenschaften ausgewählt. Andererseits stellen die Ergebnisse die Grundlage für die Prozessplanung zur Herstellung von Pumpenstrukturen dar.

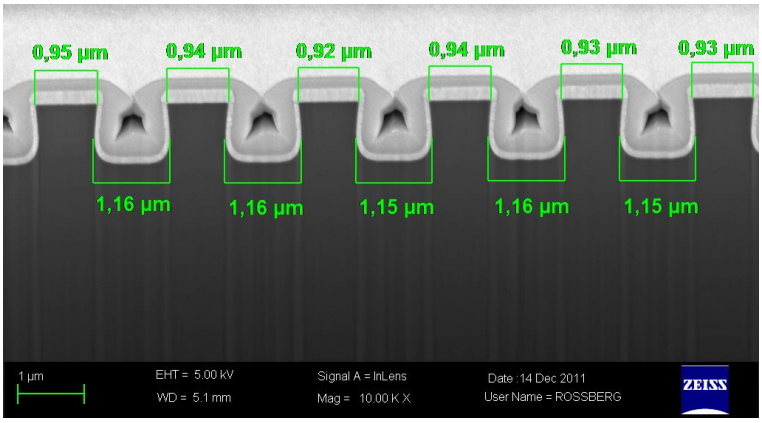

Abbildung 6: Bestes Beschichtungsergebnis Metalle: Gesputtertes Titan-Wolfram (TiW)

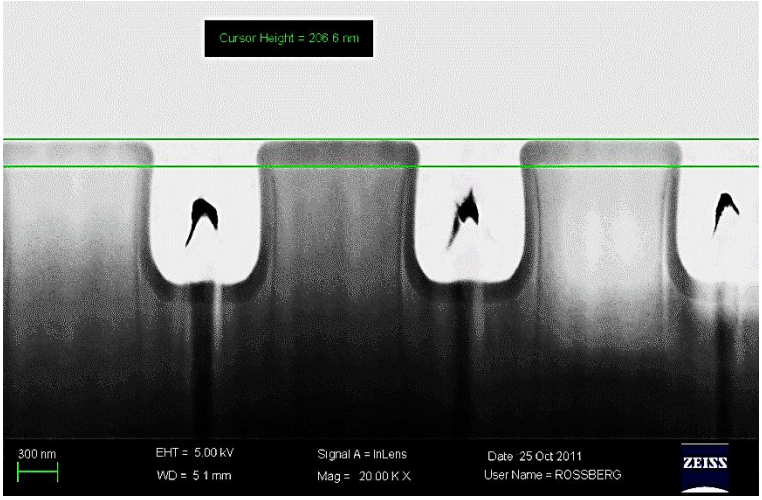

Abbildung 7: Bestes Beschichtungsergebnis Dielektrika:
Chemische Gasphasenabscheidung (LPCVD) von Siliciumnitrid (Si_3N_4)

Mit Blick auf eine spätere Prozessfolge zur Herstellung mikrofluidischer (Pumpen-)Chips ist anzumerken, dass bei der Auswahl der Schichtmaterialien zusätzliche Aspekte zu berücksichtigen sind. Beispielsweise kommt für die ohmsche Kontaktierung von p-dotiertem Silicium vorzugsweise Aluminium in Betracht, und aufgrund der vergleichsweise hohen Prozesstemperaturen sowie zu vermeidender Kreuzkontaminationen können nur Substrate mit ausgewählten Schichtmaterialien in die LPCVD-Anlage eingeschleust werden. Sobald Polymere (z. B. zu Hydrophobierungszwecken) zum Einsatz kommen, ist insbesondere die maximale Prozesstemperatur aller Folgeprozesse stark limitiert.

Theoretische Untersuchungen

Parallel zu den beschriebenen experimentellen Untersuchungen wurden theoretische Arbeiten durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die YOUNG-LAPLACE-Gleichung direkt aus der Existenz der Oberflächenspannung resultiert. Das Phänomen der den Electrowetting-Effekt begrenzenden Kontaktwinkelsättigung wurde eingehend theoretisch und experimentell untersucht. Es ergeben sich zwei Ansätze, die über den aktuellen Wissensstand hinaus mögliche Erklärungen für das Phänomen liefern und derzeit am FG MMS weiter verfolgt werden:

1) Berücksichtigung des elektrischen Widerstands des kontaktierten Flüssigkeitsvolumens unter der Voraussetzung, dass im Electrowetting-Aufbau trotz der isolierenden Zwischenschicht (Leck)Ströme fließen: In der Konsequenz kann die Flüssigkeit weder als idealer elektrischer Leiter, noch als ideales (d. h. elektrisch isolierendes) Dielektrikum modelliert werden.[15]
2) Ausbildung einer dielektrischen Doppelschicht um den die Flüssigkeit kontaktierenden Draht: in der Konsequenz muss bei der Modellierung eine zusätzliche Kapazität – die in der Young-Lippmann-Gleichung keine Berücksichtigung findet – betrachtet werden, die zur Kontaktwinkelsättigung führt und deren Betrag von der Eintauchtiefe des Drahtes im Tropfen abhängt (Abbildung 8).[16]

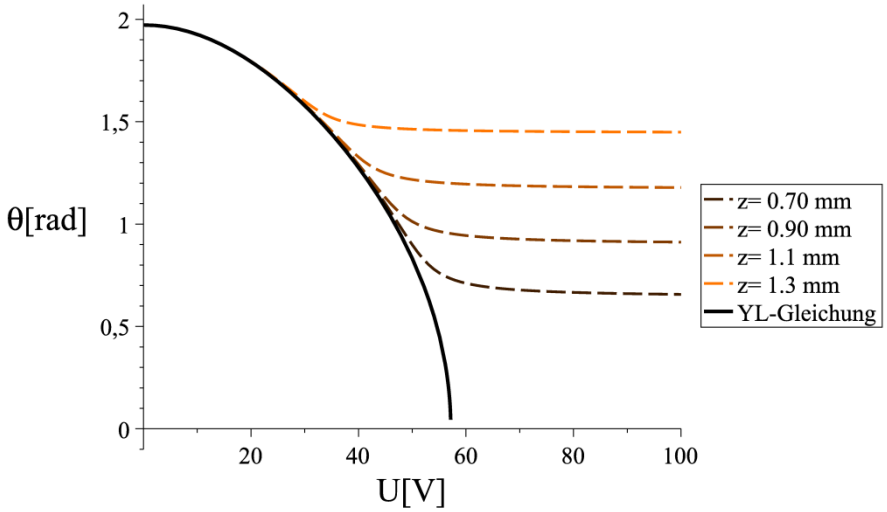

Abbildung 8: Electrowetting-Kontaktwinkel unter Berücksichtigung der Kapazität der elektrischen Doppelschicht um den Draht in Abhängigkeit von dessen Eintauchtiefe

Die Auswertung einer Literaturrecherche führte zu dem Ergebnis, dass Wasser in mikrofluidischen bzw. technischen Systemen unter Umständen nicht als Dielektrikum, sondern als *Para*elektrikum zu betrachten und zu modellieren ist. In diesem Fall kann die Permittivität des Mediums nicht mehr als konstante Materialeigenschaft angenommen werden, sondern weist eine Abhängigkeit von der jeweils vorherrschenden äußeren elektrischen Feldstärke ab.[17]

[15] B. Shapiro, H. Moon, R. L. Garrell, C.-J. Kim: Equilibrium behavior of sessile drops under surface tension, applied external fields, and material variations, In: Journal of Applied Physics, 2003, vol. 93 (9), 5794-5811
[16] D. Klarman, D. Andelman, M. Urbakh: A Model of Electrowetting, Reversed Electrowetting, and Contact Angle Saturation, In: Langmuir, 2011, vol. 27 (10), 6031-6041
[17] F. Booth, Journal of Chemical Physics, 1951, 19, 391–394 sowie I. Yeh and M. L. Berkowitz, Journal of Chemical Physics, 1999, 110, 7935–7942

Systemsimulation

Das dem Projekt zugrunde liegende Pumpprinzip erfordert, dass sich die Flüssigkeit auf den pumpenden Mikrostrukturen initial im CASSIE-BAXTER-Zustand befindet. Dieser Zustand muss auch während der elektrostatischen Auslenkung der virtuellen Membranen erhalten bleiben, d. h. der irreversible Übergang in den WENZEL-Zustand darf *nicht* erfolgen.

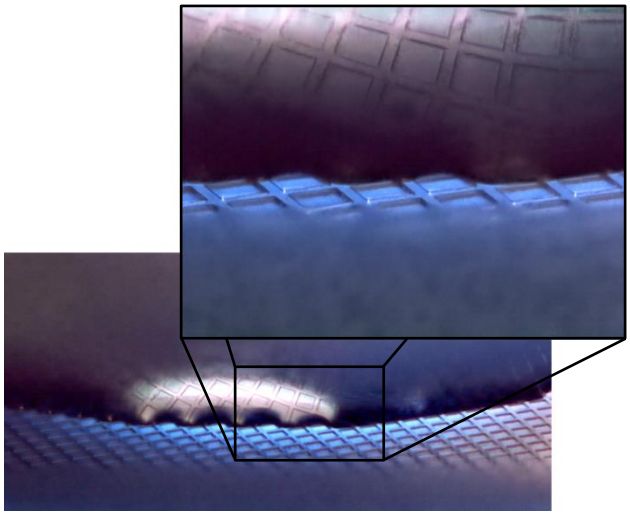

Abbildung 9: Nachweis des initialen CASSIE-BAXTER-Zustands auf den dimensionierten Pumpstrukturen

Es wurde ein Entwurfsalgorithmus für derartige pumpende Mikrostrukturen entworfen, der auf der Minimierung der totalen potenziellen Energie des Systems beruht. Eine besondere Schwierigkeit stellte dabei die Tatsache dar, dass es bislang an einer allgemein gültigen Modellierung des Übergangs von CASSIE-BAXTER- in den WENZEL-Zustand mangelt. In Abgleich mit der einschlägigen Fachliteratur war demzufolge eine Reihe von Vereinfachungen und Annahmen zugrunde zu legen. Letztendlich lässt sich ein Stabilitätskriterium für den CASSIE-BAXTER-Zustand definieren, welches durch die Differenz zwischen einem hypothetischen teilbenetzten Zustand mit der größtmöglichen Oberflächenenergie[18] und der Oberflächenenergie im CASSIE-BAXTER-Zustand gekennzeichnet ist. Diese Differenz kann als eine Art „Aktivierungsenergie“ betrachtet werden, die extern zugeführt werden muss, um den selbstablaufenden Zustandswechsel in den WENZEL-Zustand auszulösen. Die in der Fachliteratur erwähnte Energiebarriere ist dabei die lokale Stabilität des WENZEL-Zustands. Sie umfasst denjenigen Energiebetrag, der aufgebracht werden muss, damit die Flüssigkeit in den CASSIE-BAXTER-Zustand zurückkehrt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich alle bekannten Publikationen auf die Zustandsänderungen eines Tropfens auf einer strukturierten Oberfläche beziehen. Eine direkte Übertragung der Erkenntnisse auf einen geschlossenen Kanal ist nicht zulässig. Entsprechend besteht in geschlossenen Aufbauten auch keine praktische Möglichkeit für die Rückkehr der Flüssigkeit aus dem WENZEL- in den CASSIE-BAXTER-Zustand, nachdem die Gasphase einmal verdrängt wurde. Zielstellung war demzufolge die reversible Auslenkung der virtuellen Membranen auf der strukturierten Oberfläche.

[18] Die größtmögliche Oberflächenenergie korrespondiert mit der (theoretischen) Konfiguration, bei der die vertikalen Wände der Mikrostruktur benetzt sind, während die horizontalen Bodenflächen der Kavitäten gerade noch nicht benetzt sind.

Systementwurf

Für erste Tests wurde eine Matrix aus prismatischen Kavitäten mit quadratischem Grundriss als Pumpstruktur entworfen (Abbildung 10). Es wurde eine dimensionslose Stabilitätskennzahl e_{stab} abgeleitet, die sich aus den geometrischen Parametern der einzelnen Kavitäten ermitteln lässt. Auf diese Weise lässt sich die Stabilität des CASSIE-BAXTER-Zustands bei einer Variation der geometrischen Parameter darstellen (Abbildung 11).

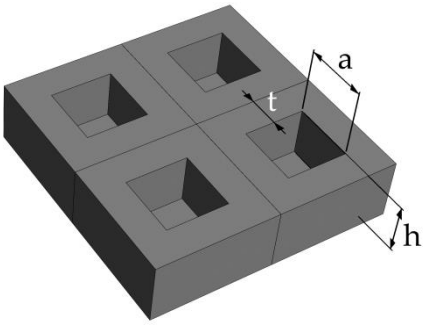

Abbildung 10: Schematische Darstellung der Kavitätenmatrix und der geometrischen Parameter

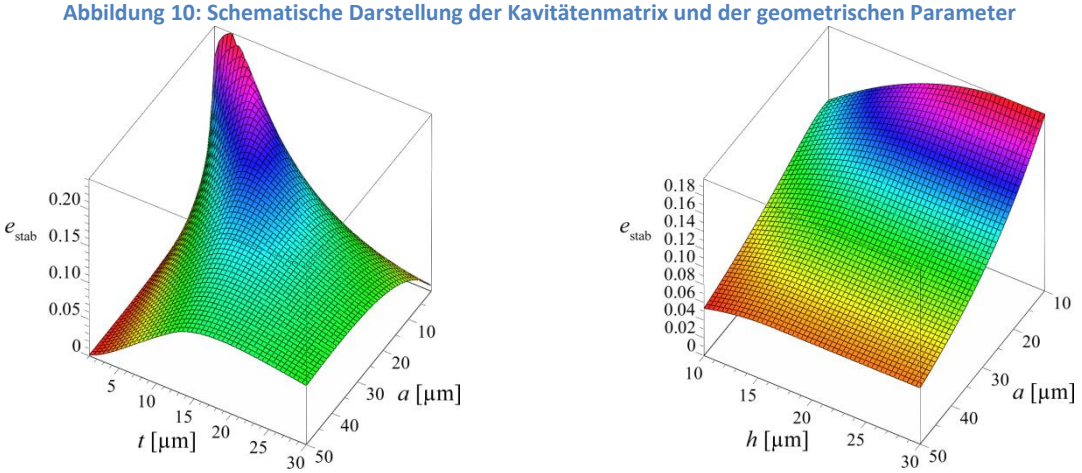

Abbildung 11: Nachweis der Stabilität des CASSIE-BAXTER-Zustands ($e_{\text{stab}} > 0$) in den relevanten Parameterbereichen

Basierend auf diesem Dimensionierungsalgorithmus wurden verschiedene Layouts der Kavitätenmatrix für die Herstellung von Labormustern ausgewählt.

Technologische Umsetzung

Abbildung 12 zeigt das initiale Technologiekonzept. Abbildung 13 zeigt die Vorder- und Rückansicht eines aufgebauten Testchips.

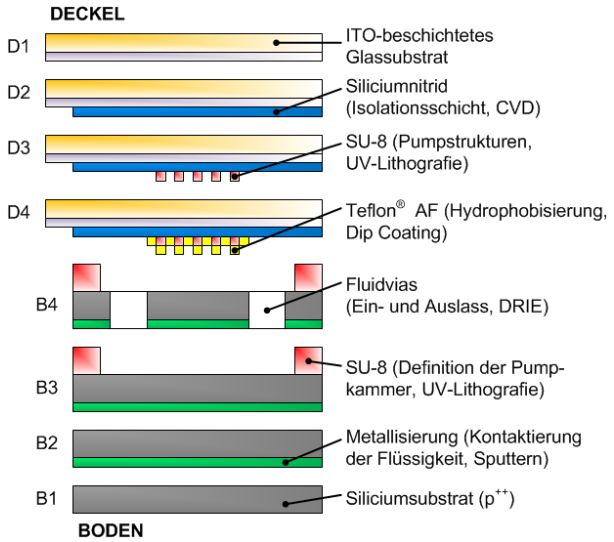

Abbildung 12: Übersicht über das Technologiekonzept (1. Design) zur Herstellung der Mikropumpe

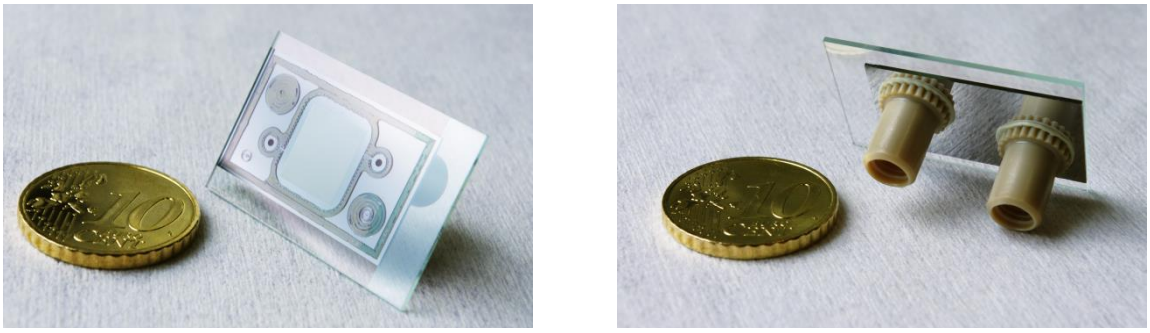

Abbildung 13: Aufgebauter Testchip in SU-8-Technologie mit NanoPorts™

Bei der Erprobung der so entstandenen Testchips stellte sich die exzellente Eignung der NanoPorts™ als fluidischer Konnektor heraus. Als problematisch ergab sich die Verwendung des fotostrukturierbaren Negativlacks SU-8 zur Definition der Pumpkammer und der fluidischen Strukturen:

- Zwischen dem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten von SU-8 und den übrigen verwendeten Materialien besteht ein Unterschied von bis zu einer Größenordnung. Über die lateralen Abmessungen der Strukturen summierte sich dieser Umstand zu starken Verspannungen der Schicht, die an vielen Stellen eine mangelnde Haftung der Strukturen zur Folge hatte. Dieser Effekt machte sich insbesondere bei AVT-Schritten bemerkbar, die unter erhöhter Temperatur ablaufen (z. B. Montage der Nanoports™ bei 165 °C).
- Entsprechend schwierig gestaltete sich die Durchführung eines auf SU-8 basierenden Bondprozesses von Deckel und Boden.
- In der Konsequenz ließ sich die hermetische Dichtigkeit der Pumpen nicht reproduzierbar sicherstellen.

Aufgrund dieser identifizierten Schwachstellen wurde mit der Erarbeitung eines alternativen Technologiekonzepts begonnen. Die pumpenden Strukturen sind dabei direkt in das Dielektrikum integriert. Für die Verbindung von Deckel und Boden wird ein Glaslot zum Einsatz kommen.

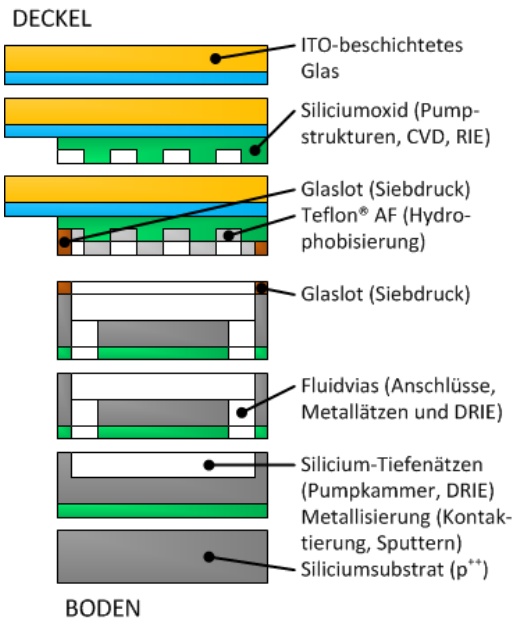

Abbildung 14: Technologiefolge zur Herstellung der Mikropumpen in Glas-Silicium-Technologie

Wichtige Teilaspekte der Systemfertigung waren:

- Vergleich der Ergebnisse verschiedener Eingangsreinigungsprozeduren für ITO-beschichtete Glaswafer. Als geeignet erwies sich die ultraschallunterstützte Verwendung einer wasserbasierten Reinigung unter Zusatz eines neutralen Reinigers. Für gröbere Partikelbelastungen der Substrate ist zusätzlich mechanisches Wischen mit weichen Reinraumtüchern erforderlich.
- Die Pumpstrukturen werden direkt in das Dielektrikum strukturiert, welches hierfür mit einer maximalen Schichtdicke von bis zu 20 µm abgeschieden wird. Die ICP-PECVD-basierte Abscheidung von Siliciumnitrid und Siliciumdioxid auf ITO-beschichteten Substraten wurde untersucht. Sowohl hinsichtlich der Schichthaftung als auch hinsichtlich der optischen Eigenschaften hat sich die Siliciumdioxidbeschichtung bewährt. Diese Schichten eignen sich zusätzlich als Hartmasken für einen Cryo-Ätzprozess von Silicium (RIE, -100 °C), der alternativ zur DRIE-basierten Ätzung der Pumpkammer in Silicium zum Einsatz kommen kann.
- Vor der Verwendung des Glaslots wurde durch Vortests sichergestellt, dass die ITO-Schichten den hierbei erforderlichen Sinterprozess bei Temperaturen bis maximal 400 °C aushalten.
- Prozessierung der Substrate (Deckel und Boden), insbesondere DRIE (Definition der Pumpkammer sowie der fluidischen Strukturen in Silicium) inklusive Prozessoptimierungen bzw. Cryo-RIE mit unterschiedlichen Maskierungsmaterialien inklusive REM-Dokumentation.
- Für die zwingend erforderliche, dauerhafte Hydrophobierung der Pumpstrukturen hat sich die Beschichtung mit Teflon® AF (dupont) bewährt. Eine weitgehend konforme Beschichtung der vertikalen und horizontalen Flächen lässt sich durch Dip-Coating der Proben in einer 1-prozentigen Lösung bei einer Auszugsgeschwindigkeit von 50 mm/min erzielen. Fluorpolymere, die in den Ätzprozessen stets entstehen, reichen hier nicht aus.

Für das Fügen von Deckel und Boden, insbesondere unter der Anforderung der Dichtheit der entstehenden Pumpkammer, wurden etliche Fügemethoden getestet: Die Verwendung von thermisch härtenden Klebstoffen, dem UV-strukturierbaren Negativlack SU-8 (Diskrepanz in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten), von UV-härtenden Klebstoffen (zu geringe Haftung) und von Klebstofffilmen

in Folienform (zu geringe chemische Beständigkeit bzw. Auflösungs- oder Quellerscheinungen bei Kontakt mit Wasser) führten jeweils zu unbefriedigenden Ergebnissen. Teilweise erfolgreich war die Verwendung des thermisch härtenden Klebstoffs *Delo Monopox MK033*, sofern die Chips bei 130 °C mindestens 15 min bei zusätzlichem Anpressdruck im Ofen getempert wurden. Anzumerken ist hierbei, dass zum initialen Befüllen der Pumpkammer ein vergleichsweise hoher Druck erforderlich ist, da die Strukturen hydrophob sind und daher der Benetzung / Befüllung einen hohen Widerstand entgegensetzen. Die Klebverbindung wird über die Grundfläche der Pumpkammer durch diesen Druck starken Kräften ausgesetzt. Wie bereits erwähnt wird im überarbeiteten Design der Pumpe für den Fügevorgang auf ein niedrigschmelzenden Glaslot (< 400 °C) zurückgegriffen.

Blasenfreies Befüllen

Blasen sind grundsätzlich Hindernisse für die angestrebte Flüssigkeitsströmung, außerdem bringen sie unerwünschte Elastizitäten in das fluidische System ein. Es hat sich gezeigt, dass sich die Chips am besten füllen lassen, wenn Wasser am Einlass der Pumpe mit einer Spritzenpumpe bei einer Flussrate von 0,2 ml/s zudosiert wird, während am Ausgang ein leichtes Vakuum anliegt, um den Befüllvorgang zu unterstützen und den dabei notwendigen Absolutdruck zu senken. Aus Videobeobachtungen des Befüllvorgangs wurde abgeleitet, dass ein hochsymmetrisches, stetiges Design der Pumpkammer erforderlich ist, um dem Einschluss von Luftblasen während der Befüllung vorzubeugen. In einem Redesign (s. u.) werden demzufolge kontinuierliche Querschnittsänderungen vorgesehen.

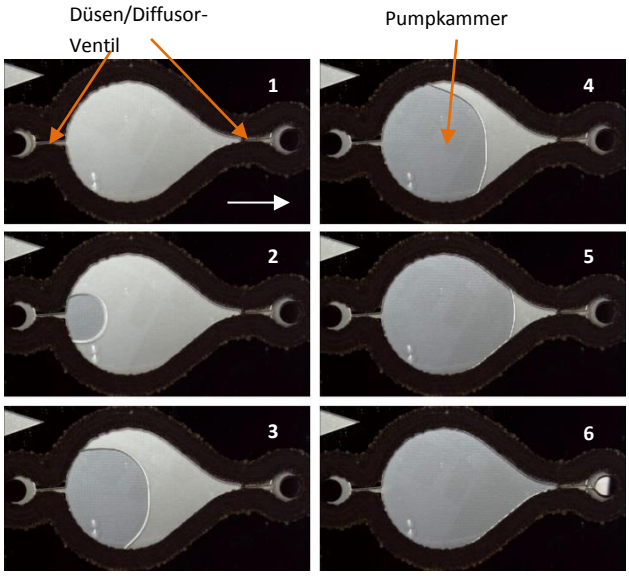

Abbildung 15: Befüllvorgang des Pumpenchips hergestellt in Glas-Silicium-Technologie (Teilbilder 1-6). Die Befüll- und Pumprichtung ist in Teilbild 1 mit dem weißen Pfeil verdeutlicht.

Messungen

Als große Herausforderung stellte sich die experimentelle Suche der Resonanzfrequenz der virtuellen Membranen auf den Mikrokavitäten bzw. die Quantifizierung von deren Auslenkung heraus. Beim Versuch der optischen Auswertung unter Nutzung einer Hochgeschwindigkeitskamera war der Kontrast, die Auflösung und die Beleuchtungsstärke nicht ausreichend, um quantitative Aussagen treffen zu können. Der Rückgriff auf ein Weißlichtinterferometer führte zu der Erkenntnis, dass mit der vorhandenen Ausstattung nicht zuverlässig auf die virtuellen Membranen fokussiert werden kann. Er-

schwert wurde dieses Experiment durch das Vorhandensein zahlreicher Grenzflächen innerhalb des Schichtaufbaus aus transparenten Materialien, die sich damit im Strahlengang des Messsystems befinden. Um die elektrostatische Auslenkung der virtuellen Membran optisch beobachten zu können, wurde der folgende Aufbau realisiert: Auf dem Deckel des Pumpenchips wurde ein Tropfen deionisiertes Wasser platziert und der Chip elektrisch kontaktiert. Mit einem Immersionsobjektiv wurde die virtuelle Membran durch den Tropfen hindurch beobachtet, wobei das Objektiv auf die elektrische Masse gelegt wurde. Die Flüssigkeit wurde exemplarisch mit 50 Hz und ca. 200 V beaufschlagt und das Bild mit einer Hochgeschwindigkeitskamera erfasst. In Abbildung 16 sieht man, dass die Flüssigkeit-Luft-Grenzfläche wie ein refraktives Element das einfallende Licht in der ausgelenkten Position mehr fokussiert als im nicht aktuierten Zustand. Damit konnte die reversible Auslenkbarkeit der virtuellen Membranen in die Mikrokavitäten hinein nachgewiesen werden.

a) 0 V b) 200 V

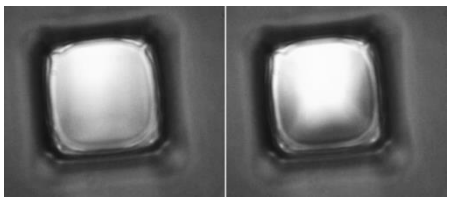

Abbildung 16: Einzelbilder von einer Kavität mit 20 µm Tiefe im nicht ausgelenkten (a) und im ausgelenkten (b) Zustand; die Mikrokavität wurde in diesem Fall aus SU-8-Dickresist hergestellt

Anhand einer Überschlagsrechnung kann die zu erwartende Pumprate abgeschätzt werden: mit den Abmessungen der Kavitäten und einer effektiven (d. h. als eben angenommenen) Auslenkung der virtuellen Membran von $d = 2\ \mu\mathrm{m}$ in die Kavitäten hinein ergibt sich ein Pumpenhub (Volumenänderung) pro Kavität von $800\ \mu\mathrm{m}^3$. Setzt man eine Ansteuerfrequenz von $f = 100\ \mathrm{Hz}$ an und legt eine Effizienz der Ventilanordnung von $\xi = 0{,}01$ sowie eine Grundfläche der Pumpkammer von $A_{\mathrm{PK}} = 100\ \mathrm{mm}^2$ zugrunde, so ergibt sich für die Pumpe ein Volumenstrom von $\dot{V} = 5{,}3\ \frac{\mu\mathrm{l}}{\mathrm{min}}$.

Fazit

Für die elektrostatische Auslenkung von virtuellen Membranen auf strukturierten Oberflächen wurde die Machbarkeit antragsgemäß nachgewiesen. Insbesondere für Wasser als zu förderndes Medium hat sich herausgestellt, dass bedingt durch die hohe Oberflächenspannung auch Strukturweiten im zweistelligen Mikrometerbereich stabil überspannt werden können. Eine einfache und zuverlässige Technologiefolge zur Integration „pumpender Mikrostrukturen“ in geschlossene mikrofluidische Kanäle sowie zum Aufbau hermetischer Chips wurde entwickelt (Abbildung 17). Für die Realisierung eines Pumpeffekts sind weitere Arbeiten erforderlich, die im Wesentlichen die Auswahl bzw. Auslegung geeigneter Ventilstrukturen zum Inhalt haben.

Mit dem Re-Design erfolgreich gelöste technologische Herausforderungen waren einerseits die Aufbau- und Verbindungstechnik, so zum Beispiel die hermetische Verbindung von Deckel und Boden der Chips sowie die zuverlässige Ankopplung an die technische Peripherie. Andererseits war dabei das Ziel, den Herstellungsprozess zu optimieren und den technologischen Aufwand mit Blick auf kostengünstige Einwegprodukte zu minimieren. Bei der Weiterentwicklung bzw. beim Re-Design der Pumpenchips wurde nicht nur das neue Technologiekonzept (Abbildung 14) berücksichtigt, sondern

das Design der Pumpkammer wurde beispielsweise auch an die experimentellen Erkenntnisse (blasenfreies Befüllen der Pumpkammer, Abbildung 15) angepasst. Außerdem ermöglicht das neue Design einen späteren Vergleich der Effizienz von Düsen-Diffusor-Mikroventilen mit Tesla- bzw. Tesser-Dioden als Beispiele passiver Ventilstrukturen.

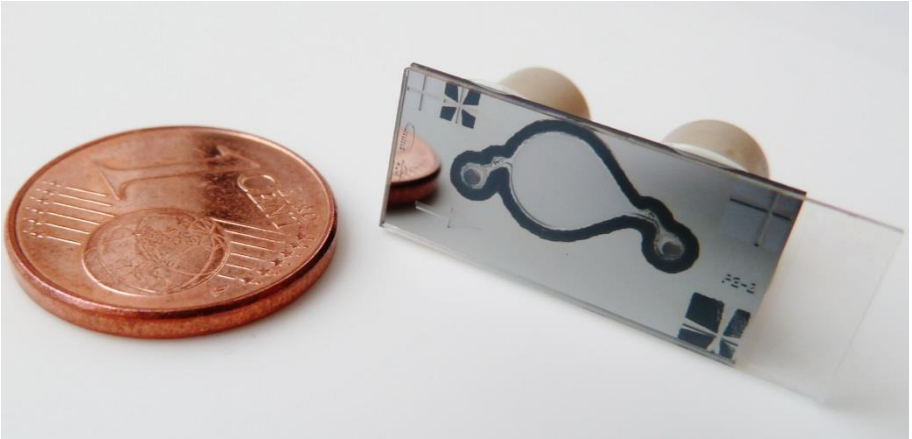

Abbildung 17: Pumpenchip in Glas-Silicium-Technologie

Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Der im Projekt erbrachte Machbarkeitsnachweis stellt eine essenzielle Grundlage für weiterführende Arbeiten dar. Einerseits wurde am Fachgebiet Mikromechanische Systeme das Know-How für die Dimensionierung superhydrophober Strukturen aufgebaut. Damit können in zukünftigen Projekten anwendungsspezifische Strukturen mit „einstellbarer“ Benetzung designt werden. Andererseits wird der Ansatz der Nutzung und Integration solcher Strukturen – insbesondere innerhalb geschlossener Kanalstrukturen – am Fachgebiet Mikromechanische Systeme weiter verfolgt. Damit die Auslenkung der virtuellen Membranen in einen technisch nutzbaren Pumpeffekt resultieren, müssen die Ventilstrukturen an den jeweils erzeugten Volumenhub sowie die herrschenden Randbedingungen angepasst werden. An dieser Stelle sind weitere Arbeiten erforderlich, welche sich mit der Auswahl und Dimensionierung der Ventilstrukturen befassen.

Die technologischen Fortschritte und Erkenntnisse lassen sich direkt auf die mikrofluidischen Chips zukünftiger Projekte übertragen. Mit dem Glaslot-basierten Bonden fluidischer Chips steht ein äußerst zuverlässiges und hermetisches Fügeverfahren für mikrofluidische Chips zur Verfügung, das bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen arbeitet und das Herausführen z. B. elektrischer Kontakte aus Fluidkammern erlaubt. Die abgeleiteten Design-Richtlinien für das blasenfreie Befüllen von mikrofluidischen Chips dienen als Grundlage für alle zukünftigen Systementwürfe.

Neben den u. g. Veröffentlichungen sind die Projektergebnisse bereits in die Anträge zu weiterführenden Arbeiten eingeflossen. Beispielsweise soll das Konzept von „Substrukturen“ am Boden der pumpenden Mikrostrukturen eingehend untersucht werden, die eine zusätzliche Barriere bei der Auslenkung der virtuellen Membranen darstellen und somit zusätzlich dem Erreichen des WENZEL-Zustands vorbeugen.

Bekannt gewordene Fortschritte an anderen Stellen

Bis zum Ende der Projektlaufzeit sind keine das Vorhaben betreffende Fortschritte an anderen Stellen bekannt geworden.

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeiten war die Federführung bzw. Begleitung des laufenden Patentierungsverfahrens sowie der Vorbereitung der Verwertung des angestrebten Patents:

- Patentanmeldung beim Deutschen Patent- und Markenamt (DPMA) unter dem Aktenzeichen 10 2010 056 076.6 wurde mit Priorität vom 20.12.2010 eingereicht.
- Nach kritischer Durchsicht des Ergebnisses des Prüfungsantrags (Bescheid vom 4.4.2011) sowie den genannten Entgegenhaltungen wurde die Entscheidung getroffen, die ursprüngliche Patentanmeldung zurückzuziehen und unter Inanspruchnahme der ursprünglichen Priorität in einer neu formulierten und erweiterten Fassung eine neue Patentanmeldung einzureichen (Eingang beim DPMA am 23.9.2011, Aktenzeichen 10 2011 115 622.8).
- Mit Unterstützung der Patentverwertungsagentur (PVA) des Landespatentzentrums Thüringen (PATON) sowie der Schutzrechtsbeauftragten der TU Ilmenau wurde die Entscheidung für eine Internationale Nachanmeldung getroffen. Hiermit wurde die universitätsexterne *Patentanwaltskanzlei Engel* in Suhl beauftragt:
  - Titel der Anmeldung: *Mikropumpe zur Erzeugung einer Fluidströmung, Pumpensystem und Mikrokanalsystem*
  - Internationales Anmeldedatum: 16.12.2011
  - Aktenzeichen: PCT/EP2011/073029
  - Offenlegungsschriften DE 102011115622 (A1) und WO 2012084707 (A1) vor.

Parallel zu den o. g. Anmeldungen wurden bereits Anstrengungen zur Verwertung des angestrebten Patents unternommen:

- Die Präsentation der Erfindung auf der *Internationalen Fachmesse „Ideen - Erfindungen – Neuheiten“ Nürnberg* am 29.10.2011 durch die PVA resultierte in der Auszeichnung der Erfindung mit einer ***Goldmedaille für hervorragende Leistungen***.[19]
- Die Patentverwertungsagentur (PVA) macht die Erfindung u. a. in der Form von Technologieangeboten[20] dem Fachpublikum öffentlich zugänglich und bemüht sich um die Verwertung des beantragten Patents. Beispielsweise wurde die Erfindung in der Form eines Exponats (vergrößertes Rapid-Prototyping-Modell der Pumpe) und des Technologieangebots jeweils auf der Hannovermesse 2012 bzw. 2013 präsentiert.

Das Pumpenprinzip wurde in der Form eines **Vortrags** mit dem Titel *Resonant electrostatic actuation of water on closed lyophobic microstructures* auf der Konferenz *8th International Meeting on Electrowetting* (21.-23.6.2012) einem internationalen Fachpublikum vorgestellt.

[19] s. a. http://www.mstonline.de/news/news/iENA2011/
[20] http://www.technologieallianz.de/webtemp/TechnologieAngebot0d628e252.pdf

Unter dem Titel *Design and Technology Concept for a Novel Micropump Coping Without Moving Mechanical Components* wurde das Pumpenkonzept in der Form eines **Posters** sowie eines **Artikels** im Konferenzband auf dem *23rd Micromechanics and Microsystems Europe Workshop* (9.-12.9.2012) vorgestellt.

Unter dem Titel *Dimensionierung und Technologiekonzept für eine neuartige Mikropumpe ohne bewegliche mechanische Teile* wurden die aktuellen Zwischenergebnisse in der Form eines **Posters**, eines **Kurzvortrags** und eines **Artikels** im Konferenzband auf dem 4. GMM-Workshop *Mikro-Nano-Integration* (12.-13.11.2012) vorgestellt.

Die Erkenntnisse der Untersuchungen geeigneter Schichtaufbauten und Werkstoffe in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet *Werkstoffe der Elektrotechnik* (Dipl.-Ing. Sören Morgenbrodt) wurden für einen **Zeitschriftenbeitrag** aufbereitet: Es wurde ein *Full Length Article* unter dem Titel *Investigation of dielectric and metal thin films in view of coverage uniformity on structured silicon surfaces by means of FIB and TEM* für das Journal *Thin Solid Film* eingereicht. Hierzu liegt derzeit das Ergebnis der ersten Durchsicht vor.

Auf dem MST-Kongress in Aachen vom 14. bis zum 16.10.2013 wurden die erzielten Ergebnisse in der Form eines **Posters** sowie eines **Artikels** im Konferenzband unter dem Titel *Mikropumpe mit elektrostatischem Direktantrieb* publiziert.

Eine Publikation der Ergebnisse in Form eines Zeitschriftenbeitrags ist in Vorbereitung.