

HYDROGEL-BASIERTE MIKROSYSTEME (HYDROGEL-BASED MICROSYSTEMS)

SPRECHER: UNIV.-PROF. DR.-ING. HABIL. GERALD GERLACH,
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Stellvertretender Sprecher:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Wallmersperger, Fakultät Maschinenwesen

Mitglieder:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Karl-Friedrich Arndt, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften
 PD Dr.-Ing. habil. Margarita Günther, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
 Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Stefan Odenbach, Fakultät Maschinenwesen
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Richter, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
 Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Brigitte Voit, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften, TUD und
 Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. (IPF)

Assoziierte Wissenschaftler:

Dr. rer. nat. Dietmar Appelhans, Dr. rer. nat. Stefan Zschoche, IPF
 Dr. rer. nat. Bernhard Ferse, Fakultät Mathematik und Naturwissenschaften

Ziel des Graduiertenkollegs ist es,

- Hydrogele mit entsprechenden Eigenschaften für die Mikrosystemtechnik zu entwickeln und numerisch bzw. experimentell zu untersuchen, insbesondere im Hinblick auf
 - hohe Langzeitstabilität der Sensitivität (Sensoren) bzw. Aktivität (Aktoren),
 - hohe Selektivität der sensorischen bzw. aktorischen Effekte, d.h. geringe Quersensitivitäten,
 - kurze Reaktions- bzw. Einstellzeiten,
 - hohe Reproduzierbarkeit der Wandlereigenschaften,
- Hydrogele für Mikrosysteme zu nutzen, wobei der Schwerpunkt auf Sensoren, Aktoren und mikrofluidischen Anwendungen sowie neuen Funktionalitäten liegt. Insbesondere sollen langzeitstabile druckkompensierte pH-Sensoren, biochemische Sensoren, leistungslose Sensorschalter, chemische Transistoren und mikrofluidische Syntheseprozessoren untersucht werden.

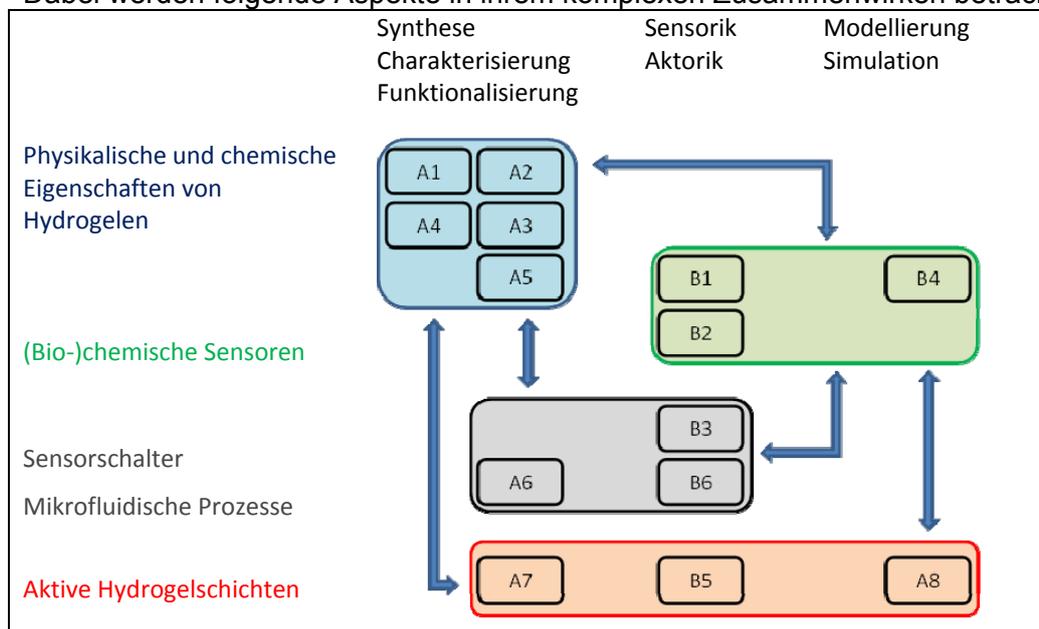
In diesem Graduiertenkolleg sollen die wissenschaftlichen Grundlagen dazu gelegt werden.

Teilbereiche des Forschungsprogramms

Entsprechend den genannten Zielen fokussiert sich das beantragte Graduiertenkolleg deshalb auf die folgenden beiden Bereiche:

- Materialien und Verfahren (**A**) und
- Mikrosysteme (**B**)

Dabei werden folgende Aspekte in ihrem komplexen Zusammenwirken betrachtet:



Beschreibung der in der 1. Phase geplanten Dissertationsprojekte

In der ersten Phase sollen zunächst die folgenden Dissertationsprojekte bearbeitet werden:

Nr.	Projektname	Betreuer	Ko-Betreuer
A	Materialien und Verfahren		
A1	Synthese und Strukturierung mechanisch stabiler und sensitiver Hydrogele zur Erschließung von Anwendungsfeldern	Arndt (Ferse)	Wallmersperger/ Odenbach
	Nanokompositgele (Polymere/Nanoclay) werden über eine photochemisch initiierte Polymerisation responsiver Monomere synthetisiert und gleichzeitig bis in den μm -Bereich strukturiert.		
A2	Elektrische und magnetische Funktionalisierung aktiver Polymere	Arndt (Ferse)	Odenbach/Gerlach
	Durch Funktionalisierung und Anwendung geeigneter Transducer (Hall, GMR) wird ein die Eigenschaften eines aktiven Polymers in Echtzeit beschreibendes elektrisches Signal erzeugt.		
A3	Poröse Hydrogele für sensorische Anwendungen	Gerlach	Voit (Zschoche)/Arndt
	Durch poröse Hydrogele soll die Ansprechzeit der Hydrogelquellung/-schrumpfung verkürzt werden. Dazu sind entsprechende poröse Hydrogele mit feinvernetzten Strukturen unterschiedlicher Porendurchmesser, jedoch enger Porenverteilung zu erzeugen und hinsichtlich der Sensorikinetik zu untersuchen.		
A4	Phasenübergänge in Gelsystemen und ihre Abhängigkeit von mechanischen Lasten	Odenbach	Arndt (Ferse)/Richter
	Einflüsse auf den Gelübergang und dessen Auswirkungen auf Struktur und Eigenschaften des gebildeten Gelsystems werden am Beispiel der Vernetzung unter dem Einfluss mechanischer Kräfte untersucht.		
A5	Rheologische und mikrostrukturelle Untersuchungen an Mischung induzierten thermosensitiven Nanokomposithydrogelen.	Odenbach	Arndt (Ferse)
	Vollständige Entwicklung des Herstellungsverfahrens von mechanisch stabilen, hochquellbaren, thermosensitiven PNIPAAm-Laponite-Mischgelen zur Erschließung verschiedener Anwendungsfelder der Sensorik und Mikrofluidik.		
A6	Aufbau von enzymatischen Reaktionskaskaden an Hydrogeloberflächen in mikrofluidischen Prozessen	Voit (Appelhans)	Richter/Günther
	Über nicht-kovalente und biokonjugierte Fixierung von Enzymen an und in Hydrogeloberflächen sollen enzymatische Reaktionskaskaden in mikrofluidischen Prozessen etabliert werden.		
A7	Komplexe bisensitive Hydrogelsysteme	Voit (Zschoche)	Richter/Wallmersperger
	Realisierung von bi-sensitiven Hydrogelen für Mikrosysteme mit hoher Sensitivität, Selektivität und Stabilität über die Gestaltung von Struktur und Morphologie der Polymersegmente.		
A8	Modellierung von Hydrogel-Schichtsystemen	Wallmersperger	Voit (Zschoche)/Richter
	Es werden sensitive zwei- und mehrschichtige Komponentenhydrogele untersucht und hinsichtlich des gekoppelten chemo-mechanischen Verhaltens abhängig von unterschiedlicher Stimulation modelliert und numerisch simuliert.		
B	Mikrosysteme		
B1	Biochemischer Sensor	Günther	Voit (Appelhans)/Arndt (Ferse)
	Entwicklung eines biochemischen Sensors mit bioverträglicher hermetischer Verkapselung für die Inline-Prozessüberwachung und für den Nachweis spezifischer Analytmoleküle, basierend auf Hydrogelen mit hoher Nachweisempfindlichkeit.		
B2	Implantierbares miniaturisiertes Sensorsystem für die biomedizinische Diagnostik	Günther	Gerlach/Arndt
	Realisierung eines robusten, miniaturisierten Sensorsystems mit großer Lebensdauer für die simultane Erfassung mehrerer Parameter für die Anwendung in der medizinischen Diagnostik.		
B3	Leistungslose Sensorschalter	Gerlach	Wallmersperger/Arndt
	Hydrogele sollen als Material für das Schaltelement in leistungslosen Sensorschaltern, wie sie gerade für energieautarke Systeme interessant sind, verwendet werden. Dabei ist insbesondere die Schalthysterese und die Schaltkinetik des Hydrogels von großer Bedeutung.		

B4	Modellierung und Simulation eines kraftkompensierten piezoresistiven Chemosensors auf Hydrogelbasis	Wallmersperger	Gerlach/Günther
	Mittels einer Modellierung durch eine gekoppelte chemo-elektro-mechanische Mehrfeldformulierung basierend auf Finiten Elementen soll untersucht werden, wie schnell und genau ein Sensor mit aufgebrachtener Gegenkraft im definiert gequollenen Zustand anspricht.		
B5	Chemische Transistoren	Richter	Voit (Zschoche)/Wallmersperger
	Ziele der Untersuchungen sind das theoretische und praktische Verständnis der Natur dieser neuartigen Bauelemente und Erkenntnisse zu möglichen Gestaltungsprinzipien.		
B6	Steuerbare mikrofluidische Syntheseprozessoren	Richter	Voit (Appelhans)
	In diesem Projekt soll die Funktionsweise hoch-integrierter Syntheseprozessoren für die Heterophasen-Fluidik auf Basis stimuli-sensitiver Hydrogele mit den Schwerpunkten Komponenten und Systemarchitektur untersucht werden.		

A1: Synthese und Strukturierung mechanisch stabiler und sensibler Hydrogele zur Erschließung von Anwendungsfeldern

K.-F. Arndt, F. Krahl (PCP) in Kooperation mit T. Wallmersperger (IFKM) und S. Odenbach (MFD)

Motivation:

Hydrogele können aufgrund ihres Quellverhaltens als aktive Elemente in Sensorik und Mikrofluidik eingesetzt werden. Die derzeit verwendeten Hydrogele weisen jedoch eine schlechte mechanische Stabilität und oftmals unzureichende aktorische Fähigkeiten auf. Die Herstellung und Strukturierung mechanisch stabiler Hydrogele für Aktoren und Sensoren wird zu einem Technologievorsprung führen.

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Temperatursensitive Hydrogele, insbesondere PNIPAAm-Gele, werden als aktive Komponenten in mikrofluidischen und sensorischen Anwendungen genutzt. Die üblicherweise durch eine freie radikalische Polymerisation in Gegenwart bifunktioneller Vernetzer hergestellten Gele weisen Nachteile auf (geringe mechanische Stabilität, begrenzter Quellungsgrad), die von Nanokomposit-hydrogelen (NC-Gele) überwunden werden. NC-Gele werden durch thermisch initiierte radikalische Polymerisation des NIPAAm in Gegenwart anorganischer Schichtsilikate synthetisiert [1]. Auch eine photochemische Synthese der NC-Gele ist möglich. Sie erlaubt eine Strukturierung der NC-Gele und führt zu neuen Synthesemethoden von stabilen NC-Gele mit besseren Quelleigenschaften [2,3].

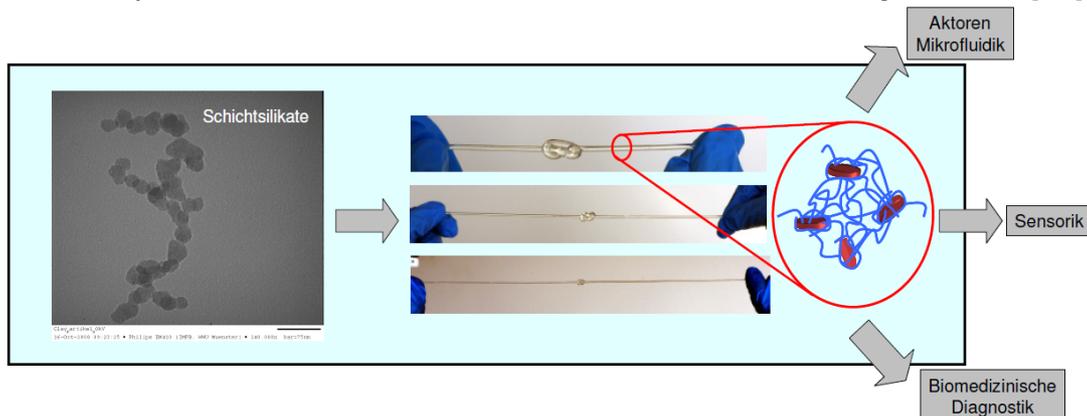


Abb.: links: REM-Aufnahme der Schichtsilikate, rechts: Vernetzung der Polymere mit Schichtsilikaten zu mechanisch stabilen NC-Gele, Bilder zeigen ein verknötetes NC-Gel.

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Ziel des Projektes ist die Synthese mechanisch stabiler sensibler NC-Gele und ihre Strukturierung für hydrogelbasierte sensorische und mikrofluidische Systeme. Ihr großer Quellungsgrad ermöglicht eine bessere Signalverarbeitung in Sensoren (B3 „Leistungslose Sensorschalter“, Gerlach, B2 „Hydrogelbasierte piezoresistive Sensoren für biomedizinische Diagnostik“, Günther). Wegen der mechanischen Stabilität der NC-Gele erhöht sich auch ihre Zuverlässigkeit in mikrofluidischen Applikationen (B5 „Steuerbare mikrofluidische Prozessoren“, B6 „Chemische Transistoren“, Richter).

Zur Erfüllung des Projektziels sind folgende Fragestellungen zu bearbeiten:

- Die mechanischen Eigenschaften der photochemisch hergestellten NC-Gele werden in Abhängigkeit von den Synthesebedingungen (Bestrahlungsdauer, Bestrahlungsleistung, Vernetzerkonzentration) charakterisiert. Eine Untersuchung der Netzwerkstruktur der NC-Gele mit rheologischen Methoden liefert Aussagen zur mechanischen Stabilität der Gele.
- Die Untersuchung der Strukturbildung der NC-Gele mit Hilfe mikroskopischer Untersuchungen sollen Aussagen zur Qualität der lithographischen Strukturierungsprozesse liefern.
- Durch Einbau strukturierter NC-Gele in verschiedene hydrogelbasierte Applikationen wird ihre Einsatzfähigkeit nachgewiesen.

Literatur:

- [1] K. Haraguchi, T. Takehisa, *Adv. Mater.*, **2002**, *14*, 1120
- [2] B. Ferse, S. Richter, F. Eckert, A. Kulkarni, C.M. Papadakis, K.-F. Arndt, *Langmuir*, **2008**, *24*, 12627
- [3] B. Ferse, M. Graf, F. Krahl, K.-F. Arndt, *Macromol. Symp.*, **2011**, *306-307*, 59–66

A2: Elektrische und magnetische Funktionalisierung aktiver Polymere

K.-F. Arndt, F. Krahl (PCP) in Kooperation mit S. Odenbach (MFD) und G. Gerlach (IFE)

Motivation:

Für sensorische und aktorische Anwendungen sensitiver Hydrogele ist die Erzeugung eines dem Quellungsgrad proportionalen elektrischen Signals vorteilhaft. Dieses kann für ein temperatur-sensitives Polymer mit einem thermoelektrischen Interface auch zur Einstellung eines definierten Quellungsgrads genutzt werden. Ein schnelles Einstellen eines Quellungsgrades ist nur für Objekte im unteren μm -Bereich möglich. Hier fehlt es an geeigneten Methoden zur Verfolgung der Quellkinetik.

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Sensitive Hydrogele können mit ferromagnetischen Nanopartikeln gefüllt und durch fotochemische und strahlenchemische Verfahren strukturiert werden [1]. Die mit einem Quellvorgang verbundene Änderung eines Magnetfeldes kann mit einem Magnetfeldsensor verfolgt werden. Bisher bekannte, auf magnetoresistiven Effekten (GMR) [2] bzw. dem Hall-Effekt [3] basierende Sensoren nutzen eine sensitive Schicht, an die ein magnetisch markiertes Objekt, z.B. aus einer Lösung, adsorbiert wird. In Vorarbeiten wurden geeignete Hall- [4] und GMR-Sensoren [5], in Verbindung mit magnetisch funktionalisierten Gelschichten und Partikeln, entwickelt und ihre prinzipielle Eignung nachgewiesen.

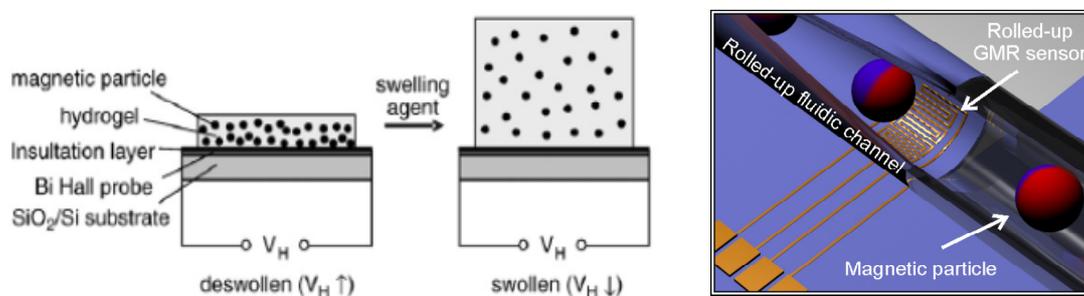


Abb.: Prinzip eines gelbasierten Hallensensors [4], GMR in einer Brückenschaltung, platziert in einem Kanal [5] (40 μm Durchmesser); V_H : Hallspannung

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Ziel des Teilprojektes ist es, die Änderung des Quellungsgrades eines sensitiven Hydrogels in Echtzeit zu messen und einen eingestellten Quellungsgrad in seiner Konstanz zu kontrollieren. Um das den Quellungsgrad beschreibende elektrische Messsignal zu erhalten, werden in die Gelsysteme magnetische Effekträger eingebracht. Das kann durch Füllstoffe, aber auch durch funktionstragende Bausteine der Netzketten erfolgen. Durch Einbringen von ferromagnetischen Partikeln in eine Gelmatrix oder das Erzeugen einer (z.B. auch strukturierten) ferromagnetischen Schicht auf einer Geloberfläche kann eine der Dimensionsänderung proportionale Magnetfeldänderung über den Halleffekt bzw. mit GMR-Sonden detektiert werden. Um die gewünschten Gele zu erhalten, werden verschiedene Techniken des Einbringens, der gezielten Anordnung und Verankerung der Effekträger untersucht. Die funktionalisierten Netzwerke als Schichten auf entsprechenden Trägerstrukturen werden mit verschiedenen Techniken strukturiert und vernetzt (bevorzugt Elektronenstrahlolithografie). Kombinationen verschiedener sensitiver Polymere in unterschiedlichen Anordnungen sind möglich. Eine Zusammenarbeit ist mit synthetischen Projekten (komplexe Hydrogele) und den Projekten B2 „Biomedizinische Diagnostik“ (Günther), B6 „Syntheseprozessor“ (Richter) geplant. Das Quellverhalten gefüllter Gele wird untersucht (Odenbach) und simuliert.

Literatur:

- [1] T. Schmidt, I. Mönch, K.-F. Arndt, *Macromol. Mat. Engin.* **2006**, 291, 755-761.
- [2] C. D. Damsgaard, S. C. Freitas, P.P. Freitas, M. F. Hansen, *J. Appl. Phys.* **2008**, 103, 07A302/1-07A302/3.
- [3] M.P.B. van Bruggen, J.B.A. van Zoon, *Sensors Act. A.* **2010**, 158, 240-248
- [4] R. Koseva, I. Mönch, J. Schumann, K.-F. Arndt, O.G. Schmidt, *Thin Solid Films* **2010**, 518, 4847-4851
- [5] I. Mönch, D. Makarov, R. Koseva, L. Baraban, D. Karnaushenko, C. Kaiser, K.-F. Arndt, O. G. Schmidt, *ACS Nano* **2011**, 5(9), 7436-7442

A3: Poröse Hydrogele für sensorische Anwendungen

G. Gerlach (IFE) in Kooperation mit S. Zschoche, B. Voit (IPF) und K.-F. Arndt (PCP)

Motivation:

Für technisch relevante Anwendungen von Hydrogelen in Sensoren und Aktoren werden eine große Sensitivität und eine schnelle Sensorantwort gefordert. Während für Ersteres große Hydrogelvolumina vorteilhaft sind, erfordern schnelle Diffusionsvorgänge dünne Sensorschichten, so dass beide Anforderungen gegenläufig sind. Durch die Verwendung poröser Hydrogele soll nun erreicht werden, dass die Diffusion des Analyten auch in dicken Schichten deutlich beschleunigt wird, ohne dass sich die Sensitivität signifikant verschlechtert.

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Zur Verkürzung der Ansprechzeit der Hydrogelquellung/ Schrumpfung werden gegenwärtig insbesondere zwei Wege verfolgt: (i) Nutzung interpenetrierender Polymernetzwerke (IPN) und (ii) Verwendung von porösen Hydrogelen. Dabei stehen bisher vor allem die Hydrogelsynthese und -charakterisierung [1] sowie die Quellkinetik im Mittelpunkt [2]. Ein wesentliches Anwendungsgebiet für poröse Hydrogele besteht in der Abgabe von Medikamenten [3].

In vorbereitenden gemeinsamen Vorarbeiten von IFE und IPF wurden makroporöse Poly(acrylamid-co-acrylsäure)-Hydrogele (PAAm-co-AA-Hydrogel) mit Polyethylenglykol als Porenbildner verwendet und als sensitive Schicht in einen piezoresistiven pH-Sensor integriert [4]. Die so erhaltenen Hydrogele weisen eine enge Porenverteilung mit einem mittleren Porendurchmesser von 3,3 µm auf (Abb.). Die Zeitkonstanten des entsprechenden pH-Sensors lag im Bereich weniger Minuten und damit deutlich kürzer als die von bisherigen Sensoren.

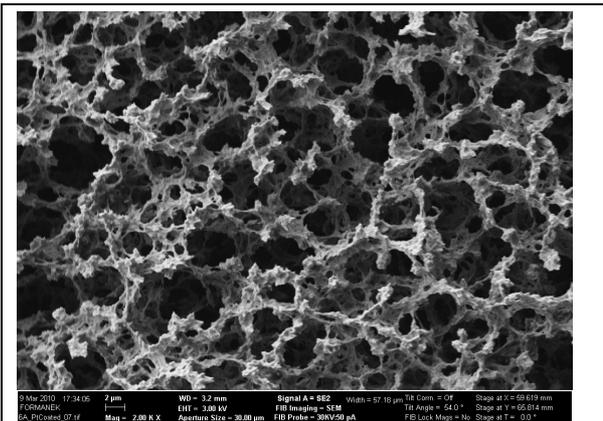


Abb.: REM-Aufnahme eines porösen PAAm-co-AA-Hydrogels mit Polyethylenglykol als Porenbildner

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Dieses Projekt soll sich mehreren Fragestellungen widmen:

- Untersuchung der Eigenschaften von Sensoren mit porösen Hydrogelen, insbesondere auch der Sensorkinetik,
- Untersuchung des Einflusses der Poren in den verwendeten Hydrogele auf deren mechanische Stabilität. Im Besonderen soll der Einfluss mechanischer Gegenkräfte auf das poröse System, eine eventuell dadurch verursachte Veränderung der Porengröße und die damit verbundene Änderung der Ansprechzeit betrachtet werden.
- Erzeugung poröser Hydrogelstrukturen mit feinvernetzten Strukturen unterschiedlicher Porendurchmesser, jedoch enger Porenverteilung (definiertes hierarchisches Porensystem). Durch die Reduktion des Anteils großer Poren ist mit einer Verbesserung der mechanischen Stabilität zu rechnen.
- Anwendung poröser Hydrogele auf Geometrien mit höherem Oberfläche-Volumen-Verhältnis als bei geschlossenen Schichten (z.B. Kugeln und Quader).

Literatur:

- [1] T. Serizawa, K. Wakita, M. Akashi, *Macromolecules* **2002**, 35(1), 10–12.
- [2] J.H. Kim, S.B. Lee, S.J. Kim, Y.M. Lee, *Polymer* **43** **2002**, 26, 7549-7558.
- [3] A.S. Hoffman, *Advanced Drug Delivery Reviews* **2002**, 54(1), 3-12.
- [4] V. Schulz, S. Zschoche, H.P. Zhang, B. Voit, G. Gerlach *Procedia Engineering* **2011**, 25, 1141-1144.

A4: Phasenübergänge in Gelsystemen und ihre Abhängigkeit von mechanischen Lasten

S. Odenbach (MFD) in Kooperation mit K.-F. Arndt, F. Krahl (PCP) und A. Richter (IHM)

Motivation:

Für die Struktur von Gelen ist die Vernetzungskinetik eine entscheidende Größe. Diese kann über die Temperatur, aber auch über mechanische Belastung durch Scherung maßgeblich verändert werden. Unklar ist an dieser Stelle der Zusammenhang zwischen der Netzwerkbildung und der finalen Gelstruktur und damit den mechanischen und insbesondere rheologischen Eigenschaften des Gels.

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Entscheidend für das Vorhaben ist die Kopplung von Mikrostrukturanalyse und rheometrischen Messungen. Hinsichtlich der Mikrostrukturaufklärung kann die Dynamische Lichtstreuung als Methode zur Verfolgung der Netzwerkbildung und zur Bestimmung des Gelpunktes genutzt werden. Wir haben dieses Verfahren bereits genutzt, um Netzwerkheterogenitäten über eine Analyse der Streuteile zu beschreiben [1]. Darüber hinaus verfügen wir über umfangreiche rheologische Vorarbeiten insbesondere zu Systemen mit magnetischen Partikeln (z.B. [2]), aber auch in nichtmagnetischen Systemen (z.B. [3]). Bei den magnetischen Systemen haben wir in der Vergangenheit umfangreiche Untersuchungen zum Zusammenhang Mikrostruktur/Rheologie [4] durchgeführt, wobei SANS-Methoden zum Einsatz kamen.

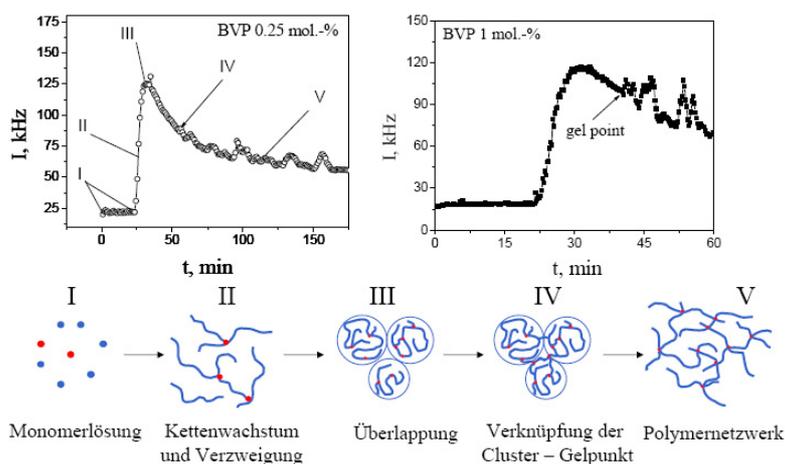


Abb.: Verfolgung der Gelbildung mit Hilfe der Dynamischen Lichtstreuung

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Das Ziel des Vorhabens ist die Verfolgung der Netzwerkbildung auf mikroskopischer Basis mit begleitenden rheologischen Messungen zur Verbesserung des Verständnisses der Lastabhängigkeit der Gelstruktur auf mikroskopischer Basis.

Ziel des Projektes ist die Untersuchung des Phasenübergangs in Gelen unter mechanischer Last, wobei gezielt die Struktur des Gelnetzwerks untersucht und mit den rheologischen Messungen korreliert werden soll.

Zur Erfüllung der Projektziele sind folgende Fragestellungen zu bearbeiten:

- Die Gelbildung wird unter mechanischer Last für verschiedene chemische Zusammensetzungen der Gele charakterisiert.
- Die mechanischen Eigenschaften der Gele und ihre Veränderung durch die Lasteinwirkung werden über rheologische Untersuchungen bestimmt.
- Über begleitende mikrostrukturelle Messungen wird die Netzwerkstruktur charakterisiert und mit den mechanischen Eigenschaften korreliert.

Literatur:

- [1] F. Krahl, V. Boyko, K.-F. Arndt: *Polymer*, **2010**, 51, 2576-2584
- [2] S. Odenbach: *Springer Lecture Notes in Physics* m71 **2002**
- [3] D. Borin, P. Nikrityuk, S. Odenbach: *Applied Rheology* **2009** 19:6, 61995.
- [4] L. M. Pop, S. Odenbach: *Journal of Physics: Condensed Matter* **2006** 18, 38, S2785

A5: Rheologische und mikrostrukturelle Untersuchungen an mischungsinduzierten thermosensitiven Nanokomposithydrogelen

S. Odenbach (MFD) in Kooperation mit K.-F. Arndt, F. Krahl (PCP)

Motivation:

Aufgrund schlechter mechanischer Eigenschaften smarter Hydrogele ist eine tatsächliche Anwendung dieser polymeren Netzwerke bisher problematisch. Die Herstellung von temperatursensitiven Nanokomposithydrogelen (NC-Gele) durch eine *in-situ* Polymerisation in Gegenwart von Schichtsilikaten stellt derzeit die einzige einfache Alternative zur Synthese mechanisch stabiler sensitiver Hydrogele dar. Die Erfassung mechanischer Kenngrößen der Reaktionslösung während der Netzwerkbildung durch rheologische und mikrostrukturelle Untersuchungen führt zu einem Optimierungsprozess dieser Herstellungsvariante.

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Die Polymerisation der Nanokomposithydrogele erfolgt frei radikalisch aus den Monomeren. Hier wurden Vorarbeiten zur photochemischen Initiierung [1] durchgeführt. Darüber hinaus verfügen die Arbeitsgruppen über umfangreiche Erfahrung in der Mikrostrukturanalyse mittels Streumethoden [2] und Röntgenmikrotomographie [3], die zur Aufklärung der Füllstoffverteilung genutzt werden kann.

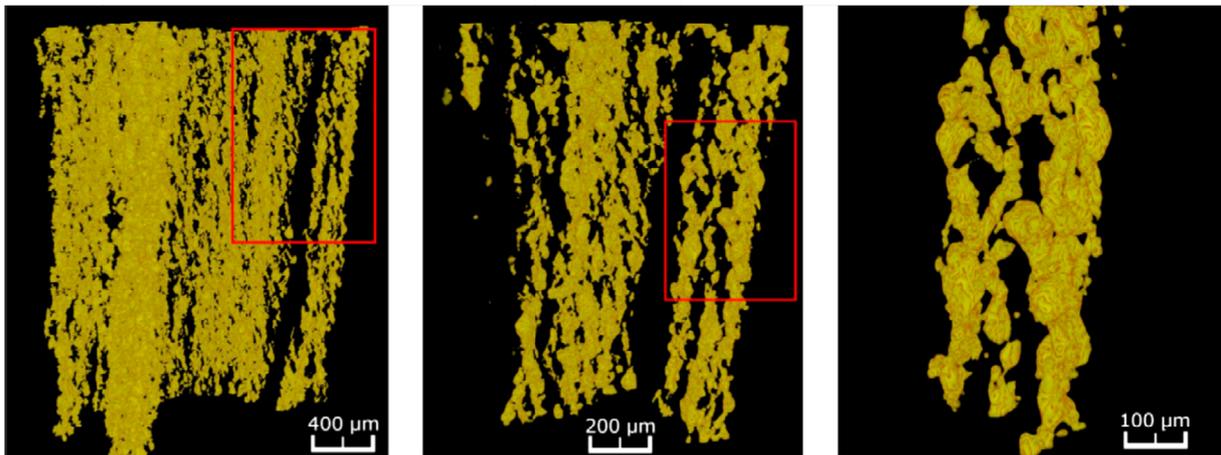


Abb.: Röntgentomographische Analyse magnetischer Füllstoffe in einem Elastomer nach Polymerisation im Magnetfeld. Die rote Box zeigt jeweils den Ausschnitt für das nächste Bild.

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Projektziel ist die Entwicklung eines Herstellungsverfahrens für mechanisch stabile, hochquellbare, thermosensitive PNIPAAm-Laponite Mischgele. Eine Verfolgung der Netzwerkbildung auf mikroskopischer Basis mit begleitenden rheologischen Messungen liefert Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften der Reaktionslösung während der Gelierung. Zur Erfüllung des Projektzieles sind folgende Fragestellungen zu berücksichtigen:

- Optimierung der Herstellungsmethoden thermosensitiver NC-Mischgele.
- Rheologische Untersuchungen zu den mechanischen Kenngrößen der Gele in Abhängigkeit der Syntheseparameter.
- Aufklärung der mikrostrukturellen Entwicklung des Gels durch SAXS oder SANS Messungen mit gekoppelten molekulardynamischen Simulationen.
- Aufklärung der mikrostrukturellen Verteilung der Füllstoffe durch röntgenmikrotomographische Untersuchungen.

Literatur:

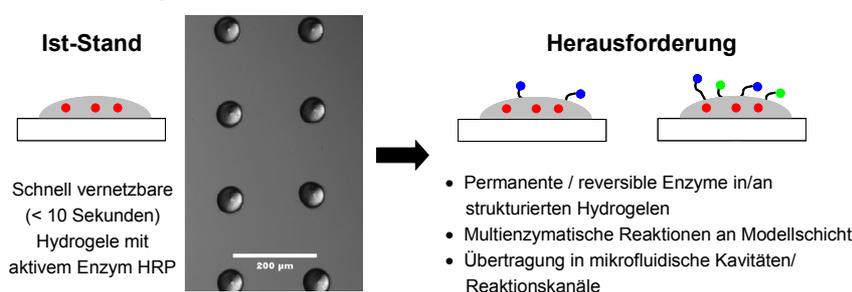
- [1] B. Ferse, S. Richter, F. Eckert, A. Kulkarni, C.M. Papadakis, K.-F. Arndt: *Langmuir*, **2008**, *24*, 12627
- [2] L. M. Pop, S. Odenbach: *Journal of Physics: Condensed Matter* **2006** *18*, 38, S2785
- [3] D. Günther, D. Yu. Borin, S. Günther, S. Odenbach: *Smart Mater. Struct.* **21** **2012** 015005

A6: Aufbau von enzymatischen Reaktionskaskaden in/an Hydrogelen in mikrofluidischen Prozessen

B. Voit (TUD, IPF) und D. Appelhans (IPF) in Kooperation mit A. Richter (IHM) und M. Günther (IFE)

Motivation:

Die Nutzung von Mikrokanälen ermöglicht parallelisierte und seriell geschaltete Enzymreaktionen. Die reversible, aber auch chemische Fixierung von Enzymen in/an Hydrogelen und deren Integration in Mikrokanälen als strukturierbare Materialien soll eine neue Herausforderung in der enzymatischen Reaktionskaskade im Bereich der Miniaturisierung darstellen. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik (IHM) sollen dazu am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. (IPF) steuerbare Hydrogel-basierte mikrofluidische Prozessoren entwickelt werden. Hierzu sollen (Glycopolymer-)Hydrogele zur selektiven und reversiblen, aber auch permanenten Funktionalisierung mit Enzymen und die Adaption der Hydrogele zur Freisetzung von Substraten für enzymatische Reaktionen genutzt werden.



Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Mikrofluidische Prozesse in Reaktionskanälen/-kavitäten für optische, (elektro-)chemische und enzymatische Umsetzungen sind schon seit langem bekannt. Dagegen spielen parallelisierte sowie seriell geschaltete stationäre und kontinuierliche mikrofluidische Prozesse, insbesondere multi-enzymatische Umsetzungen an definierten Oberflächen, eine untergeordnete Rolle. Erste einfache mikrofluidische Prozesse mit Hydrogelen sind für enzymatische Umsetzungen bekannt [1,2]. Eigene Vorarbeiten fokussierten sich auf die Etablierung pH-stabiler und quellbarer Hydrogelschichten [3,4], die u.a. zur Fixierung von Biotinliganden für die Anbindung von Enzymen einsetzbar sind. Ebenso beschäftigen wir uns mit der erfolgreichen Immobilisierung von Enzymen (HRP) in strukturierten und schnell vernetzbaren (< 10 Sekunden) Hydrogelgeometrien an planaren Substraten. In allen Fällen zeigten die Enzyme langzeitstabile und reproduzierbare enzymatische Aktivitäten.

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Langfristiges Ziel des Projektes ist die Realisierung parallel und seriell geschalteter enzymatischer Reaktionskaskaden auf der Basis von multifunktionalen Hydrogelen, die eine reversible und permanente Funktionalisierung von Enzymen, aber auch einen zeitnahen Transportaustausch von Edukt und Produkt im Hydrogel für mikrofluidische Prozesse zulassen. Der Nachweis erfolgreicher Umsetzungen erfolgt mittels optischer/chemischer/piezoelektrischer Prinzipien in Kooperation mit B1 (IFE, Günther). Neben der Adaption der Hydrogele und ihrer Funktionalisierung in parallelisierten/seriell geschalteten Mikroreaktionskanälen (Kooperation mit B6, Richter) müssen erfolgreich die verschiedenen Kombinationen zur Funktionalisierung strukturierter Hydrogele zur Etablierung von Enzymkaskadenreaktionen, aber auch in einfachen Reaktionskanälen nachgewiesen werden. Enzymatische Modellreaktionen (Hydrolyse von Estern, Abbau von Proteinen, Amidierung von Säurefunktionen u.a.) sollen in fluiden Mikroprozessen erfolgreich integriert werden (Kooperation mit B6, Richter). Mit der Etablierung fluider Mikroprozesse sollen enzymatische Reaktionen kostengünstig über einen Mehrstufenprozess realisiert werden.

Literatur:

- [1] J. Heo, R.M. Crooks, *Anal. Chem.* **2005**, *77*, 6843
- [2] W.-G. Koh, M. Pishko, *Sensors and Actuators B* **2005**, *106*, 335.
- [3] Z. Özyürek, K. Franke, M. Nitschke, R. Schulze, F. Simon, K.-J. Eichhorn, T. Pompe, C. Werner, B. Voit, *Biomaterials* **2009**, *30*, 1026
- [4] A. Richter, A. Jahnke, S. Zschoche, R. Zimmermann, F. Simon, K.-J. Eichhorn, B. Voit, D. Appelhans, *New J. Chem.* **2010**, *34*, 2105

A7: Komplexe bisensitive Hydrogelsysteme

B. Voit (TUD und IPF) und S. Zschoche (IPF) in Kooperation mit A. Richter (IHM) und T. Wallmersperger (IFKM)

Motivation:

Die Kopplung stimuli-sensitiver Eigenschaften und funktionaler Komponenten in einer Hydrogelmatrix geeigneter Dimension stellt eine Grundvoraussetzung für Mikrofluidsysteme dar. Die Kombination kann bereits in segmentierten polymeren Bausteinen der Hydrogele oder durch Kombination verschiedener Polymernetzwerke erfolgen. Von der Durchdringung auf molekularem Niveau bei IPN über eine Sandwichstruktur bis hin zur physikalischen Mischung von Beads sind hier Lösungen geeignet. Ein wichtiger Aspekt aller Hydrogelsysteme stellt deren Morphologie dar, welche sich mit der Netzwerkbildung einstellt und die wesentlich die Beweglichkeit von Molekülen in der Matrix bestimmt und damit auch die Dynamik der Zustandsänderungen der Hydrogelmatrix selbst nach entsprechender Stimulierung. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik (IHM; Richter (B5)) sollen am IPF die Grundlagen für Hydrogelsysteme geschaffen werden, die sich für steuerbare mikrofluidische Prozessoren mit hoher Leistungsfähigkeit eignen.

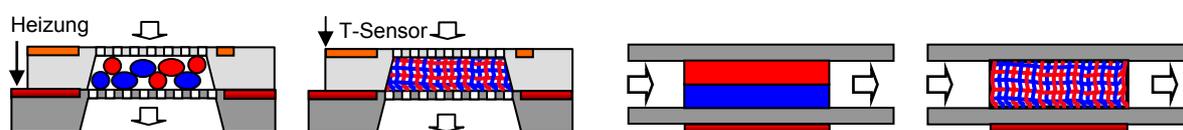


Abb.: Varianten der bi-sensitiven Hydrogelmatrix

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Stimuli-responsive Hydrogele werden vielfältig für Anwendungen in Aktorik und Sensorik diskutiert, wobei diese auf zahlreiche Faktoren wie Änderungen der Temperatur, des pH-Wertes, des elektrischen oder magnetischen Feldes oder der Konzentration z.B. eines Analyten ansprechen können [1]. In eigenen Vorarbeiten konnte die Kombination von T-sensitiven und pH-sensitiven Eigenschaften in einem Polymermolekül auf Basis von PNiPAAm, gepfropft mit funktionalen Polyoxazolinseitenketten, und Oxazolinblockcopolymeren entsprechender Segmente realisiert werden. Die Pfropfcopolymeren zeigen T-abhängig ein ausgeprägtes amphiphiles Verhalten, d.h. durch Selbstorganisation bilden sich polymere Aggregate, die nachträglich vernetzt werden konnten [2]. Außerdem liegen in der Arbeitsgruppe Erfahrungen vor zur Synthese von Beads mit Durchmessern von 20 bis 1000 μm auf der Grundlage sowohl einer vernetzenden Polymerisation als auch durch reaktiver Vernetzung von aktiviertem Heparin mit multifunktionellen PEG-Aminen [3]. Beads und Hydrogelschichten bzw. Volumengele wurden mit offenporigen Strukturen synthetisiert. Die Modifizierung von SiO_2 -Oberflächen (Glas, Si-Wafer) und Polymeroberflächen mit Hydrogelen ist in der Arbeitsgruppe ein andauernder Schwerpunkt.

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Ziel ist es, auf der Basis stimuli-sensitiver Polymere Hydrogelmatrizes zu schaffen, die nach Eigenschaften, Form und innerer Struktur für mikrofluidische Prozesse geeignet sind. Teilaufgaben sind die Synthese von bi-sensitiven Blockcopolymeren, deren Formung zu struktureinheitlichen Hydrogelen sowie die Synthese von sensitiven 2-Komponentenhydrogelen mit entsprechenden Morphologien und die Charakterisierung der Hydrogelmatrix bzgl. Struktur und Eigenschaften in Abhängigkeit variierender Stimulationen. Dabei soll eine Komponente gezielt computersteuerbar sein (z.B. durch Temperaturerhöhung), um die andere Komponente definiert, auch in ihrer Sensitivität, zu beeinflussen, welche die eigentliche chemische Regelfunktion des Transistors realisiert. Damit werden die stoffliche Grundlagen für chemische Mikrotransistoren als Bauelemente mikrofluidischer Prozessoren (B5 „Chemische Transistoren“) geschaffen.

Literatur:

- [1] R. Messing, A.M. Schmidt, *Polym. Chem.* **2011**, 2, 18-32
- [2] S. Zschoche, J. Rueda, M. Binner, H. Komber, A. Janke, K.-F. Arndt, S. Lehmann, B. Voit, *Macromol. Chem. Phys.* **2012**, 213, 215–226
- [3] P. Welzel, S. Prokoph, A. Zieris, M. Grimmer, S. Zschoche, U. Freudenberg, C. Werner, *Polymers* **2011**, 3, 602-620

A8: Modellierung von Hydrogel-Schichtsystemen

T. Wallmersperger (IFKM) in Kooperation mit B. Voit, S. Zschoche (IPF) und A. Richter (IHM)

Motivation:

Polyelektrolytische Gele können durch Aufnahme bzw. Abgabe von Lösungsmitteln eine große Volumenänderung erzielen. Hierbei treten lokale Phasentransformationen innerhalb der Gele auf, die einhergehen mit lokalen Änderungen der mechanischen Eigenschaften, wie z.B. der Steifigkeit. Die Kopplung unterschiedlicher stimuli-sensitiver Eigenschaften kann durch eine Verwendung von komplexen Hydrogelsystemen, bestehend aus beschichteten Hydrogelen bzw. bi-sensitiven Hydrogelkompositen, erfolgen.

Am Institut für Festkörpermechanik (IFKM) sollen in Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. (IPF) und dem Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik (IHM) sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen von komplexen Hydrogelsystemen als Anwendung neuartiger fluidischer Bauelemente durchgeführt werden.

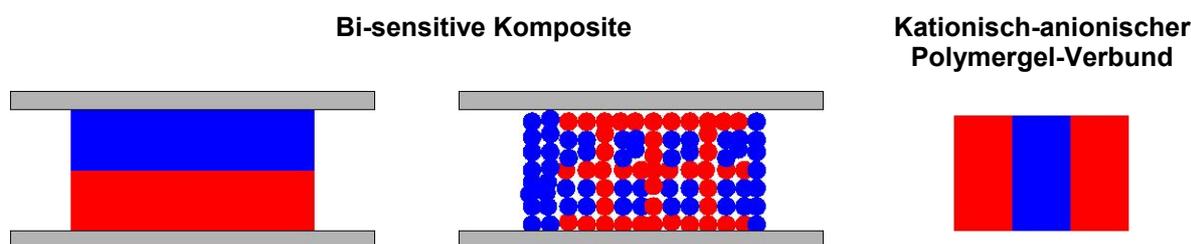


Abbildung: Bi-sensitive und beschichtete Hydrogele

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Die Modellierung und Simulation des Quellungsverhaltens von Hydrogelen wurde zuerst im Rahmen von globalen makroskopischen Untersuchungen mittels thermodynamischen Gleichgewichtsmodellen durchgeführt. Einfachere Ansätze, die ein lokales Verhalten des Gleichgewichts sowie der Quellungskinetik von pH-sensitiven und temperatur-sensitiven Hydrogelen beschreiben, sind in [1] und [2] dargestellt.

In eigenen Arbeiten wurde eine Finite-Elemente-basierte chemo-elektro-mechanische Mehrfeldformulierung entwickelt, die in der Lage ist, sowohl chemische, elektrische und mechanische Größen zu ermitteln und für chemische und elektrische Stimulation anwendbar ist [3]. In ersten Untersuchungen konnte ebenfalls gezeigt werden, dass auch diskrete Elemente [4] für eine Kopplung des chemischen und mechanischen Verhaltens denkbar sind. Als Basis für mehrschichtige Hydrogele können die Modellierung und Simulation von einzelnen Hydrogelen, kombiniert mit Modellierungsmethodiken für mehrschichtige Lamine, herangezogen werden.

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Ziel ist es, auf der Basis stimuli-sensitiver Polymere mehrschichtige bzw. beschichtete Hydrogele zu schaffen, die nach Eigenschaften, Form und innerer Struktur für mikrofluidische Prozesse geeignet sind. Hierzu sollen sensitive zwei- und mehrschichtige Komponentenhydrogele modelliert und hinsichtlich des gekoppelten chemo-mechanischen Verhaltens abhängig von variierender Stimulation simuliert werden. Bei zweischichtigen Komponentenhydrogelen soll eine Komponente gezielt steuerbar sein, um die andere Komponente definiert, auch in ihrer Steifigkeit und Sensitivität, beeinflussen zu können. Des Weiteren sollen die Schichten unterschiedliche Sensitivitäten aufweisen, um mehrere Eigenschaften des zu untersuchenden Fluids simultan detektieren zu können.

Im Rahmen des Projekts sollen Untersuchungen mit kombinierten kationisch-anionischen und neutralen Hydrogelen durchgeführt werden, die sowohl das jeweilige sensitive Verhalten der einzelnen Schichten/Komponenten als auch den Einfluss der Schichten untereinander darstellen können.

Literatur:

- [1] K. Keller, T. Wallmersperger, B. Kröplin, M. Günther, G. Gerlach, *Mechanics of Advanced Materials and Structures* **2011**, 18(7), 511-523
- [2] T. Wallmersperger, K. Keller, B. Kröplin, M. Günther, G. Gerlach, *Colloid and Polymer Science* **2011**, 289(5-6), 535-544
- [3] T. Wallmersperger, D. Ballhause, *Smart Materials and Structures* **2008**, 17, 045012
- [4] T. Wallmersperger, F. K. Wittel, M. D'Ottavio, B. Kröplin, *Mechanics of Advanced Materials and Structures* **2008**, 15(3-4), 228-234

B1: Biochemischer Sensor

M. Günther (IFE) in Kooperation mit D. Appelhans, B. Voit (IPF) und K.-F. Arndt, F. Krahl (PCP)

Motivation:

Für die Inline-Prozessüberwachung in der Umweltschutz- und Prozessmesstechnik, in der Trink-, Grund-, Abwasser- und Galvanotechnik sowie in der Biotechnologie, Lebensmittel- und Pharmaindustrie sind biochemische piezoresistive Tauchsensoren (Abb.) von großem Interesse, die inline für entsprechende chemische und biochemische Verfahrensprozesse und für den schnellen Nachweis geringster Mengen gelöster Stoffe verwendet werden können. Eine neue Herausforderung dabei ist die Integration der strukturierbaren Hydrogele mit immobilisierten Biomolekülen in piezoresistiven Sensorchips. In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. (IPF) und mit der Professur für Physikalische Chemie der Polymere (PCP) der TU Dresden sollen am Institut für Festkörperelektronik (IFE) der TU Dresden neuartige piezoresistive Sensoren für die Immunodiagnostik entwickelt werden.

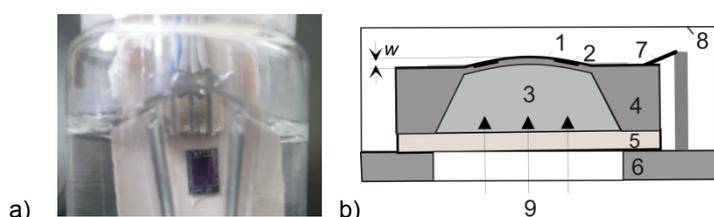


Abb.: Tauchsensoren (a) und sein Aufbau (b):

1 Biegeplatte ($3 \times 3 \times 0,02 \text{ mm}^3$), 2 mechano-elektrischer Wandler (piezoresistive Widerstandsbrücke), 3 Hydrogel, 4 Si-Chip ($5 \times 5 \times 0,4 \text{ mm}^3$), 5 poröse Membran, 6 Substrat, 7 Kontakt, 8 Kappe, 9 Lösung

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Viele herkömmliche Analysetechniken erzielen hohe Nachweisempfindlichkeiten, doch sie erfordern in der Regel einen hohen apparativen Aufwand oder bestehen aus zeitintensiven Mehrschrittverfahren. Das einfache Sensorkonzept der Nutzung piezoresistiver Drucksensorchips mit einer analyt-sensitiven Hydrogelschicht ermöglicht preiswerte und robuste biochemische Sensoren, die miniaturisierbar und Inline-fähig sind [1, 2].

In den eigenen Vorarbeiten wurde demonstriert, dass die elektrische Ausgangsspannung der aufgebauten Sensoren direkt dem Quellverhalten der Hydrogele entspricht [1-3]. In ersten Tests mit dem Human-Serum Albumin (HSA) haben sich fotovernetzbare polykationische Blockcopolymerer von Poly-N-Isopropylacrylamid für die Detektion von Proteinen in wässrigen Lösungen als geeignet erwiesen. Allerdings sind bis zur realen Anwendung für konkrete Einsatzgebiete noch einige wichtige Fragen zu klären [3] und Konstruktionsvarianten abzuleiten, die eine einfache integrierte Herstellung mit einem effektiven und langzeitstabilen Packaging ermöglichen.

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Im Rahmen des Projekts sollen in Kooperation mit B3 (IFE, Gerlach) die Grundlagen für piezoresistive biochemische Sensoren, basierend auf dreidimensionalen Hydrogelen mit eingebundenen Enzymen untersucht werden. Dazu sollen in Kooperation mit A6 (IPF, Appelhans/Voit) und mit A1 (PCP, Krahl) passende biokompatible Hydrogele für den Nachweis von kleinsten Analytkonzentrationsänderungen bereitgestellt werden.

Folgende Fragestellungen sind zu lösen:

- Untersuchung des Einflusses der chemischen Zusammensetzung der verwendeten Enzym-Hydrogel-Systeme auf Sensitivität, Ansprechzeit und Reproduzierbarkeit des Sensors.
- Anwendung geeigneter Aufbau- und Verbindungstechniken zum direkten Sensoranschluss an Flüssigkeitsprobenvolumina sowie Entwicklung einer bioverträglichen hermetischen Verkapselung des Sensors und Untersuchung von deren Eigenschaften, wie Bioverträglichkeit, insbesondere mögliches toxisches Verhalten, Impermeabilität und Langzeitstabilität gegenüber Degradationsprozessen.
- Untersuchung des Einflusses von Sterilisationsprozessen auf die Nachweisempfindlichkeit des Gels.

Literatur:

- [1] G. Gerlach, K.-F. Arndt (eds.): Hydrogel Sensors and Actuators, Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors, vol. 6. **2009**, Springer-Verlag. Berlin Heidelberg
- [2] M. Guenther, G. Gerlach, T. Wallmersperger, *Microsystem Technologies* **2010**, 16(5), 703
- [3] M. Guenther, G. Gerlach, T. Wallmersperger, *J. Intell. Material Syst. Struct.* **2009**, 20, 949

B2: Implantierbares miniaturisiertes Sensorsystem für die biomedizinische Diagnostik

M. Günther (IFE) in Kooperation mit G. Gerlach (IFE) und K.-F. Arndt (PCP)

Motivation:

Um die Therapie bei Stoffwechselkrankheiten, z. B. bei Diabetes mellitus, besser steuern zu können, werden geeignete Messsysteme benötigt, die mehrere metabolismusrelevante Parameter (Blutzuckerspiegel, pH-Wert, CO₂-Konzentration) gleichzeitig und kontinuierlich rund um die Uhr erfassen können. Eine neue Herausforderung dabei ist ein implantierbares drahtloses Sensorarray-Mikrosystem (Abb.) bestehend aus mehreren hydrogel-basierten piezoresistiven Sensoren, die eine In-line-Überwachung physiologischer Parameter in menschlicher Körperflüssigkeit und eine rechtzeitige Insulininfusion mit Hilfe einer geregelten Insulinpumpe ermöglichen. In Zusammenarbeit mit der Professur für Physikalische Chemie der Polymere (PCP) der TU Dresden sollen dazu am Institut für Festkörperelektronik (IFE) der TU Dresden die vier piezoresistiven Drucksensoren mit Glukose-, pCO₂-, pH- und ionenstärke-sensitiven Hydrogelschichten als analyterkennenden Elementen in eine einheitliche neuartige Plattform auf einem Si-Chip integriert werden.



Abb.: Sensorarray (8x8x0,4 mm³)
(a) und Einzelsensor mit einer perforierten Biegeplatte (b)

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Die Vorteile piezoresistiver Sensoren, verbunden mit den besonderen Quelleigenschaften der Hydrogele, lassen sich nutzen, um zuverlässige Biosensoren zu entwickeln, die maßgeschneidert für die Detektion bestimmter Spezies sind und die für die In-line-Überwachung in der medizinischen Diagnostik geeignet sind [1, 2]. Eigene Vorarbeiten fokussierten sich auf die experimentelle Untersuchung und Modellierung der komplexen Quellkinetik und der Diffusionsprozesse in ionischen Hydrogelen, um die Sensitivität, Selektivität, Reproduzierbarkeit und Ansprechzeit piezoresistiver biochemischer Sensoren zu verbessern [1, 3]. Es wurde gezeigt, dass ein schnelles Einstellen eines Quellungsgrades nur in dünnen Schichten im unteren µm-Bereich möglich ist, jedoch auf Kosten von niedrigeren Quellmesswerten. Hier fehlt es an geeigneten Herstellungsverfahren und Methoden zur Gestaltung der Mess- und Kalibriervorgänge, um das Optimum zwischen der Ansprechzeit und der Sensitivität des Gels zu erreichen und patientenrelevante Information mittels hydrogel-basierter Biosensoren schnell liefern zu können.

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Ziel dieses Projektes ist die Realisierung eines robusten, miniaturisierten Sensorsystems mit großer Lebensdauer für die medizinische Diagnostik. Dazu sollen passende hybride Hydrogele mit einer Struktur, die schnellere Quellvorgänge ermöglicht, in Kooperation mit A2 (PCP, Prof. K.-F. Arndt) bereitgestellt und untersucht werden. Die vier Drucksensoren mit Glukose-, pCO₂-, pH- und ionenstärke-sensitiven Hydrogelschichten sollen auf einem Si-Chip integriert werden. Die Grundlagen für die gleichzeitige Erfassung einiger Parameter mittels einer einheitlichen Plattform sind in Kooperation mit A3 (IFE, Prof. G. Gerlach) zu untersuchen.

Dieses Projekt soll sich mehreren Fragestellungen widmen:

- Untersuchung der Struktur-Eigenschaftsbeziehungen nanostrukturierter dünner Hydrogelschichten, insbesondere bezüglich der Quellkinetik.
- Untersuchung des Diffusionsverhaltens der Glukosemoleküle in Hydrogelen und der Wechselwirkungsvorgänge zwischen Glucose und den glukosesensitiven Polymergruppen, um die Möglichkeiten einer gezielten Manipulation der Ansprechzeit der Gelquellung zu prüfen.
- *In vitro* Untersuchung der Eigenschaften von Sensoren in physiologischen Modellflüssigkeiten in Anwesenheit von Proteinen.

Literatur:

- [1] G. Gerlach, K.-F. Arndt (eds.): Hydrogel Sensors and Actuators, Springer Series on Chemical Sensors and Biosensors, vol. 6. **2009**, Springer-Verlag. Berlin Heidelberg
- [2] G. Lin, S. Chang, H. Hao, P. Tathireddy, M. Orthner, J. Magda, F. Solzbacher, F., *Sens. Actuat. B* **2010**, 144, 332
- [3] Guenther, M., Gerlach, G., Wallmersperger, T., Solzbacher, F., Magda, J.J., Lin, G., Tathireddy, P., Orthner M.P., in: Electroactive polymer actuators and devices (EAPAD) 2011, Y. Bar-Cohen, F. Carpi (eds.), Proc. SPIE **2011**, 7976, 79762D

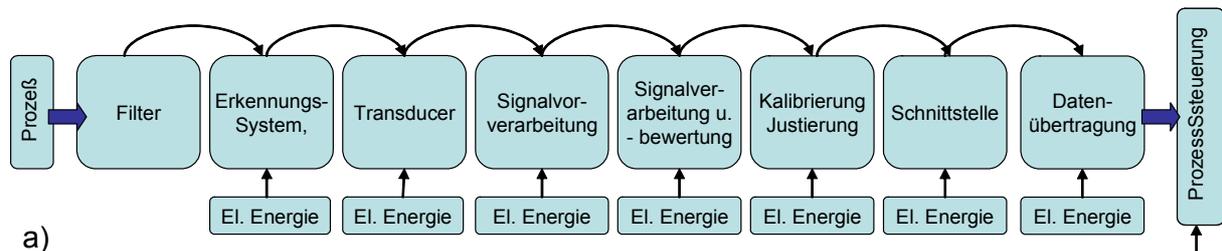
B3: Leistungslose Sensorschalter

G. Gerlach (IFE) in Kooperation mit T. Wallmersperger (IFKM) und K.-F. Arndt (PCP)

Motivation:

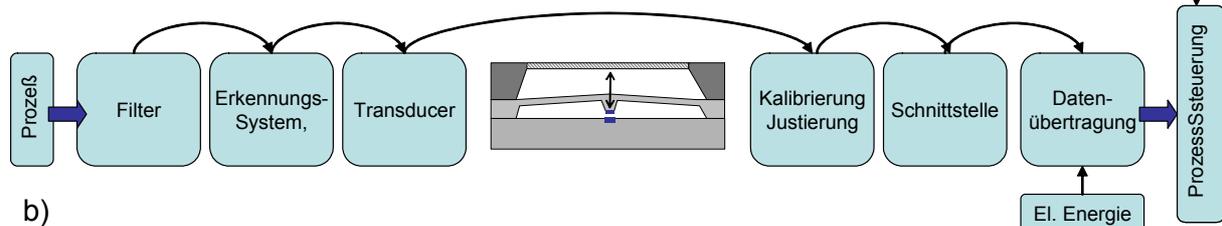
Energieautarke Sensor- und Mikrosysteme sind sensorische Bausteine, die ihre für Betrieb und Datentransfer benötigte Energie aus dem aktuellen Umfeld entnehmen. Eine signifikante Reduktion der benötigten elektrischen Leistung ließe sich erreichen, wenn die Sensoren in allen Betriebszuständen ohne Energie auskämen, auch wenn sie in-line sind. Wird die Schaltenergie aus der Quellung Stimuli-sensitiver Polymere (z.B. Hydrogele) entnommen, indem diese auf mechanischem Wege einen elektrischen Kontakt schließt, entsteht ein sensitiver Mikroschalter, der für die Sensor- und die elektrische Schaltfunktion keinerlei elektrische Versorgungsspannung benötigt (s. Abb.).

Signalsystem autarker Sensorsysteme gem. Stand der Technik



a)

Signalsystem unter Verwendung leistungsloser binärer Sensoren



b)

Abb.: (a) Autarke Sensorsysteme vs. (b) leistungslose Binäre Zero-Energy Sensoren (BIZEPS)

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Leistungslose Schalter sind seit langer Zeit z.B. von den Bimetall-Elementen in Temperatur-Zweipunktreglern bekannt. Für miniaturisierte, mikrosystemtechnische Elemente sind sie erstmals in [1,2] vorgeschlagen worden. In [3] ist eine Studie vorgestellt worden, die die prinzipielle Nutzbarkeit des Prinzips gezeigt hatte. In diesem Projekt sollen Stimuli-responsive Hydrogele als selektiv erkennendes Wandlerelement verwendet werden, da sie gegenüber bisher untersuchten bimorphen Prinzipien deutlich größere Schaltkräfte erzeugen können.

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Im Rahmen des Projekts sollen die Grundlagen für leistungslose Sensorschalter untersucht werden. Dazu sind die sorptiv-mechanischen Eigenschaften im Zusammenwirken mit dem Schaltelement zu untersuchen, wobei insbesondere die Schalthysterese durch Hydrogel und Schaltelement von großer Bedeutung sind. Zu lösende Fragestellungen betreffen z.B. folgende Punkte: notwendige Schaltenergie und damit notwendiges Hydrogolvolumen; konstruktive Gestaltung; Schaltdynamik.

Literatur:

- [1] I. W. Rangelow, G. Gerlach, H. Bartuch, A. Steinke: DE OS 10 2007 063 558 A1 vom 25.06.2009
- [2] I.W. Rangelow, G. Gerlach, H. Bartuch, A. Steinke, R. Röder: Patentanmeldungen WO 2009/077446 A1 vom 25.06.2009 und EP 2008067404 vom 12.12.2008
- [3] T. Frank, G. Gerlach, A. Steinke, Smart Sensors, Actuators and MEMS. Prague, 18-20 April 2011. Proceedings of SPIE Vol. 8066, 8066-68

B4: Modellierung und Simulation eines kraftkompensierten piezoresistiven Chemosensors auf Hydrogelbasis

T. Wallmersperger (IFKM) in Kooperation mit G. Gerlach und M. Guenther (IFE)

Motivation:

Polyelektrolytische Gele sind elektroaktive Materialien, die durch Aufnahme bzw. Abgabe von Lösungsmittel große Volumenänderungen erzielen können. Sie besitzen sowohl sensorische als auch aktorische Fähigkeiten. Bisher vorhandene Sensoren auf Hydrogelbasis ermöglichen zwar bereits Messungen von Konzentrationen mit Genauigkeiten im Bereich einiger Prozent, benötigen jedoch aufgrund des Ionentransports und des Kriechverhaltens des Materials längere Zeit bis zur Bereitstellung eines stationären reproduzierbaren Ergebnisses.

Kraftkompensation verhindert weitgehend das Quellen des Hydrogels durch die Messlösung, in dem ein Gegendruck erzeugt wird. Deshalb soll in Zusammenarbeit mit dem Institut für Festkörperelektronik (IFE) am Institut für Festkörpermechanik (IFKM) ein Hydrogelsensor mittels Kraftkompensation numerisch untersucht werden. Durch die Verwendung des Sensors in einem definierten gequollenen Zustand können Kriech- und Hystereseeffekte vermindert werden.

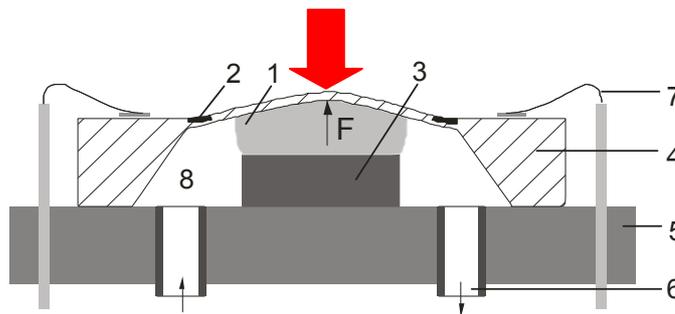


Abbildung: Piezoresistiver Hydrogelsensor bestehend aus: 1 Hydrogel, 2 Piezowiderstand, 3 Silizium-Substrat, 4 Silizium Drucksensorchip, 5 Sockel, 6 fluidischer Kanal, 7 elektrischer Kontakt (Bonddraht), 8 Messflüssigkeit

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Experimentelle Untersuchungen zu chemischen und pH-detektierenden Hydrogel-Sensoren wurden u.a. in [1] dokumentiert. Hierbei zeigte es sich, dass diese Arten von Sensoren bereits ein viel versprechendes Verhalten hinsichtlich der Detektion der Zusammensetzung der Messflüssigkeit liefern.

Im Rahmen der Modellierung wurden von Brock et al. [2] erste numerische Untersuchungen für dynamische Zustandsänderungen in Gelen entwickelt.

In eigenen Arbeiten wurde eine gekoppelte Mehrfeldformulierung für intelligente Hydrogele entwickelt. Mit dieser Formulierung wurden erste numerische Simulationen für polyelektrolytische Gele als Aktoren und Sensoren durchgeführt [3].

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Im Rahmen des Projekts soll ein Hydrogelsensor in einem definierten gequollenen Zustand numerisch untersucht werden. Durch eine Änderung der Konzentrationen oder der Zusammensetzung der zu untersuchenden Lösung muss eine modifizierte Gegenkraft auf den Sensor aufgebracht werden, um den definierten geometrischen Zustand des Sensors zu erhalten. Mittels einer Modellierung durch eine gekoppelte chemo-elektro-mechanische Mehrfeldformulierung, basierend auf der Finite-Elemente-Methode, soll untersucht werden, wie schnell und in welcher Art der Sensor anspricht. Ein Abgleich der numerischen Ergebnisse erfolgt mit experimentell ermittelten Werten des IFE-Sensordemonstrators, vgl. Abbildung. Ziel des Projekts ist es, mittels des entwickelten numerischen Modells das gekoppelte chemo-elektro-mechanische Verhalten des vorhandenen Sensors nachzurechnen sowie die Sensor-geometrie zu modifizieren, um die Funktion des Sensors zu verifizieren.

Literatur:

- [1] G. Gerlach, M. Guenther, J. Sorber, G. Suchaneck, K.-F. Arndt, A., *Sensors and Actuators B: Chemical* **2005**, 111-112, 555-561
- [2] D. Brock, W. Lee, D. Segalman, und W. Witkowski, *J. Intelligent Material Systems and Structures* **1994**, 5, 764-771
- [3] T. Wallmersperger, D. Ballhause, B. Kröplin, M. Günther, G. Gerlach, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **2009**, 20(12), 1483-1492

B5: Chemische Transistoren

A. Richter (IHM) in Kooperation mit S. Zschoche, B. Voit (IPF) und T. Wallmersperger (IFKM)

Motivation:

Chemische Transistoren (auch als Chemostatventile bezeichnet) vereinen aktorische und sensorische Eigenschaften in einem einzigen Bauelement. Dies befähigt sie, analog zu ihren elektronischen Entsprechungen einen Fluss zu regulieren, allerdings anstatt eines Elektronenflusses einen Materiefluss. Bei Erreichen ihrer Schwellwert- bzw. Schaltkonzentration eines bestimmten Stoffes ermöglichen oder unterbinden sie einen Stofffluss. In miniaturisierter, integrationsfähiger Form bilden sie zudem in Analogie zu ihrer elektronischen Entsprechung die Grundlage für eine automatisierte, mikrochip-basierte Verarbeitung chemischer Information sowohl für kontinuierliche als auch diskrete Computer-Paradigmen. Allerdings sind chemische Transistoren noch nicht vollständig verstanden und auch noch nicht theoretisch bearbeitet.

Am Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik (IHM) sollen in Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. (IPF) die theoretisch-experimentellen Grundlagen für diese neue Art fluidischer Bauelemente gelegt werden.

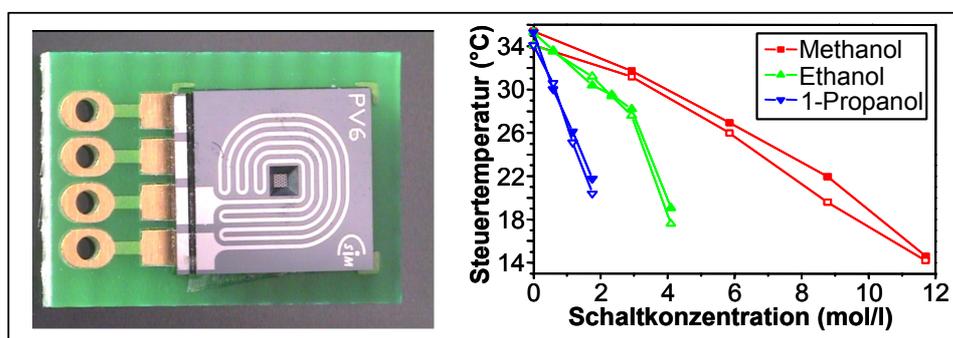


Abb.: Chemischer Transistor und die Abhängigkeit seiner Schaltkonzentration von der Steuertemperatur [2].

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

An der TU Dresden entstand eine Technologieplattform für aktorische und sensorische Mikrosysteme auf Basis stimuli-sensitiver Hydrogele [1]. Sie ist nicht nur hochintegrationsfähig, sondern offeriert auch eine einzigartige Multifunktionalität. Auf dem Gebiet der Mikrofluidik lassen sich nicht nur die Mikropumpen und Mikroventile, sondern auch chemische Mikrosensoren sowie die bislang unbekanntenen chemischen Transistoren [2,3] realisieren. Der Schwellwert (z.B. eine Konzentration) dieser Transistoren, bei dem sie öffnen oder schließen, lässt sich elektronisch einstellen. Im Zuge von Überlegungen zur Integration dieser Elemente in fluidische Schaltungen stellte sich heraus, dass ihre Natur und ihr Eigenschaftsprofil noch wenig verstanden sind. So sind sie nicht nur steuerbare fluidische Widerstände, sondern lassen sich gleichzeitig als Speicher auffassen.

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Ziele des Projektes sind das Verständnis der Natur dieser Bauelemente und Erkenntnisse zu grundsätzlichen Fragestellungen. Ist der Transistor-Schwellwert scharf genug für eine Diskretisierung der chemischen Information? Unter welchen Bedingungen lässt sich welches Computerparadigma nutzen? Die Bauelemente werden auf Basis einer elektroanalogen Netzwerkbildung modelliert. Diese Methode erlaubt es, den Transistor mit Teilmodellen genau zu beschreiben und zu verstehen, wobei die Modellparameter so zu wählen sind, dass sie mit einfachen Mitteln experimentell bestimmbar sind. Zur Validierung der Modelle sind applikative Untersuchungen durchzuführen. Ein zweiter Projektschwerpunkt beschäftigt sich mit den konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten chemischer Transistoren. Es sind die Prinzipien des Aufbaus und der Beschaltung dieser Elemente zu untersuchen. Eine wesentliche Rolle spielen dabei die am IPF entwickelten bisensitiven Hydrogele.

Literatur:

- [1] A. Richter, Hydrogels for actuators. In G. Gerlach, K.-F. Arndt (Eds.): Hydrogel Sensors and Actuators **2009**, Chapter 7. Springer Berlin
- [2] A. Richter, A. Türke, A. Pich, Controlled double-sensitivity of microgels applied to electronically adjustable chemostats. *Adv. Mater.* **2007**, 19, 1109-1112.
- [3] A. Richter, J. Wenzel, K. Kretschmer, Mechanically adjustable chemostats based on stimuli-responsive polymers, *Sens. Actuat. B* **2007**, 125, 569-573

B6: Steuerbare mikrofluidische Syntheseprozessoren

A. Richter (IHM) in Kooperation mit B. Voit, D. Appelhans (IPF)

Motivation:

Fluidische Mikroprozessoren besitzen das Potenzial, die chemische und biologische Synthese auf ein neues methodisches Fundament zu stellen. Durch die Automatisierung der Syntheseprozesse, welche noch heute überwiegend manuell ausgeführt werden, lässt sich nicht nur der Zeit- und Materialaufwand drastisch reduzieren, sondern auch deren Präzision, Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit durch Ausschluss der Fehlerquelle Mensch signifikant erhöhen.

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. (IPF) und der Professur Physikalische Chemie der Polymere sollen am Institut für Halbleiter- und Mikrosystemtechnik (IHM) die Grundlagen für steuerbare mikrofluidische Syntheseprozessoren mit hoher Leistungsfähigkeit geschaffen und an konkreten Synthesebeispielen untersucht werden.

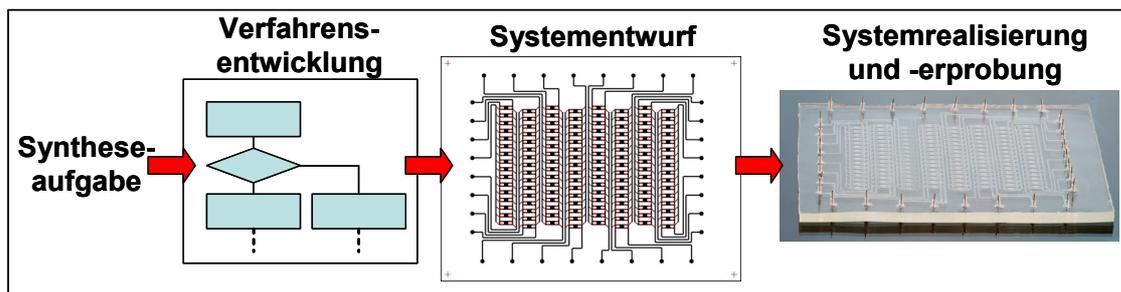


Abb.: Entwicklungsprozess eines mikrofluidischen Syntheseprozessors

Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten:

Bereits als einfaches Durchflusssystem erweist sich die segmentfluss- bzw. tröpfchenbasierte Mikrofluidik als eine ungemein potente Plattform zur Synthese polymerer Mikropartikel. Mit ihrer Hilfe lassen sich auf einfache Weise sphärische und nichtsphärische (Disks, Rods, Plugs usw.) sowie ein- und mehrkomponentige (Core-Shell-, Janus-, Multischicht-) Partikel mit ausgezeichnet kontrollierbaren Eigenschaften herstellen [1]. Die Realisierung steuerbarer Systeme, welche durch eine aktive Manipulation der Prozesse auf dem Mikrochip noch viel leistungsfähiger sein können, gelang bislang nicht. Als aussichtsreichstes Steuerprinzip der Segmentfluss-Mikrofluidik gilt gegenwärtig die elektromodulierte Benetzung [2], welche allerdings technologische Beschränkungen der Integrationsdichte und des Integrationsgrades besitzt.

In eigenen Arbeiten entstand eine Technologieplattform auf Basis stimuli-sensitiver Polymere, welche nach der Mikropneumatik die zweite hochintegrationsfähige aktorische Mikrotechnologie ist [3]. Sie offeriert zudem eine einzigartige Palette monolithisch integrierbarer aktiver fluidischer Grundelemente, welche Mikroventile, Mikropumpen, chemische Transistoren und Mikrosensoren umfasst [4].

Wissenschaftliche Fragestellung und Projektziele:

Ziel ist es, die Grundzüge höher integrierter steuerbarer Syntheseprozessoren des Segmentflussprinzips auf Basis stimuli-sensitiver Hydrogele zu erforschen. Die Grundelementepalette soll um segmentflussspezifische aktive Komponenten erweitert werden. Insbesondere schaltbare Speicherelemente, aktive Mischer und Druckquellen können den konstruktiven Spielraum beträchtlich erweitern. In einem weiteren Schritt sind die elementaren fluidischen Funktionseinheiten bzw. Grundschaltungen als Bausteine für große integrierte Schaltungen zu entwickeln. Prinzipiell werden Synthesen eine serielle, parallele oder seriell-parallele Abfolge von Teilaufgaben besitzen. Diese Abfolgen werden sich in parallelen, seriellen oder gemischten Prozessorstrukturen abbilden. Die Systeme sind anhand konkreter Aufgabenstellungen zusammen mit den Kooperationspartnern zu untersuchen.

Literatur:

- [1] D. Dendukuri, P. Doyle, The synthesis and assembly of polymeric microparticles using microfluidics. *Adv. Mater.* **2009**, 21, 1–16.
- [2] M. Abdelgawad, A.R. Wheeler, The digital revolution: a new paradigm for microfluidics, *Adv. Mater.* **2008**, 20, 1–6.
- [3] A. Richter, G. Paschew, Optoelectrothermic control of polymer-based highly integrated MEMS applied in an artificial skin, *Adv. Mater.* **2009**, 21, 979–983.
- [4] A. Richter, Hydrogels for actuators. In G. Gerlach, K.-F. Arndt (Eds.): *Hydrogel Sensors and Actuators* **2009**, Chapter 7. Springer Berlin