Schlussbericht

Verbundprojekt: Erforschung faser-/folienförmiger IPMC-Aktoren und darauf basierender Bewegungsmodelle (IPMC-Aktor) – Teilvorhaben: Verbund vorstrukturierter Polymeraktoren zu Bewegungssystemen und Festlegung funktioneller Parameter

FKZ: 13N10279

I Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Im Aufruf des Bundesministeriums für Bildung und Forschung im Rahmen der Fördermaßnahme „Werkstofftechnologien von morgen – Wissenschaftliche Vorprojekte in Werkstoff- und Nanotechnologien“ innerhalb des WING-Programms wurden in der Rahmenbekanntmachung vom 20.05.2008 unter Punkt (1) innerhalb der Werkstoffklasse der Elektroaktiven Polymere die Ionischen Polymer-Metall-Komposite (IPMC) explizit angesprochen.

Mit dem daraufhin beantragten Verbundprojekt „Erforschung faser-/folienförmiger IPMC-Aktoren und darauf basierender Bewegungsmodelle (IPMC-Aktor)“ sollte ein Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms zum Schwerpunktthema „Elektroaktive Polymere“ geleistet werden. Dabei wurde im Abstimmung mit dem Projektpartner TITK Rudolstadt das Teilvorhaben: „Verbund vorstrukturierter Polymeraktoren zu Bewegungssystemen und Festlegung funktioneller Parameter“ an der TU Ilmenau bearbeitet.

Das Projekt betraf grundlegende Fragestellungen der Verbesserung von IPMC-Aktoren einerseits bezüglich ihrer Leistungsparameter Kraft, Auslenkung und Verformungsgeschwindigkeit, andererseits bezüglich ihrer Lebensdauer. Die Leistungsdichte betreffend, wird an dieser Stelle auf Abb. a verwiesen.

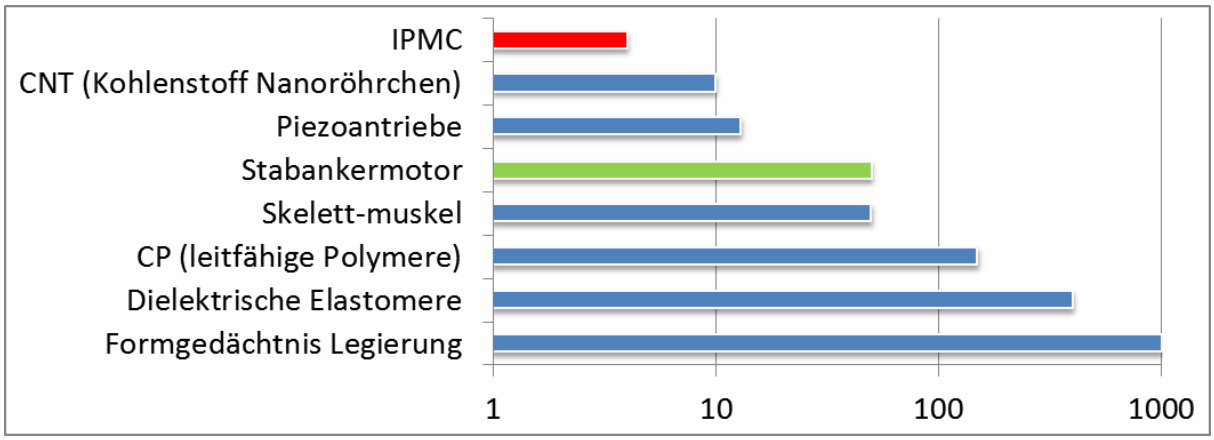


Abb. a: Vergleich der substrat-physikalisch begründeten Leistungsdichten [W/kg]

Potential zur Verbesserung wurde dabei in der Modifikation des Polymers, des Solventen, des Metallisierungsverfahrens, der elektrischen und mechanischen Kontaktierung sowie der Höhe Betriebsspannung gesehen.

Weiterhin sollten durch neue geometrische Formen (z.B. Fasern) ein zur unidirektionalen Biegebewegung zusätzlicher Freiheitsgrad in der Bewegung erreicht werden.
Auf diesem breiten Fundament sollten Aktoren realisiert werden, die neue oder verbesserte Anwendungsmöglichkeiten erlauben. Dazu zählen auch IPMC-Zuschnitte zur Optimierung des Kraft-Masse-Verhältnisses. Eine Möglichkeit der Anwendung besteht in der Förderung und Dosierung von Fluiden, welche allerdings eine Systemintegration bzw. einen auskoppelbaren Nutzleistungsanteil erfordert und zum Zeitpunkt der Beantragung des Vorhabens noch nicht in dieser Form existierte. Dazu sollte ein Funktions- und Demonstrationsmodell erstellt werden, welches aus mehreren hintereinander geschalteten Antriebsmodulen besteht und in der Lage ist, dauerhaft ein Fluidvolumen zu fördern, was stellvertretend für das Erreichen eines Entwicklungsstandes ist, der die Auskopplung eines Nutzleistungsanteils eines systemintegrierten IPMCs ermöglicht.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Projektkoordination übernahm das TITK Rudolstadt. Der Projektkoordinator bereitete die zur Durchführung des Gesamtarbeits- und Zeitplans notwendigen Arbeitssitzungen vor, alternierend wurden diese an beiden Standorten durchgeführt. Mit dem Projektpartner bestehen mehrjährige Kontakte, die im Rahmen eines DFG-Innovationskollegs (Bionik der Bewegungssysteme) zum gemeinsamen Testen eines anderen elektroaktiven Polymers (Polypyrrol) als „künstlicher Muskel“ führten. Dem damals genutzten Substrat ist das Nafion™ hinsichtlich der Biokompatibilität und der Leistungsdichte überlegen. Ähnlich gelagerte Kontakte liegen unter anderem mit international ausgewiesenen Kompetenzträgern zur Polymeraktorik (Prof. D. De Rossi am Centro Piaggio Pisa (I). mit Frau Prof. E. Smela vom Techn. College of Linköping University (S) z. Tl. als gemeinsame Publikation vor.
Arbeiten zur Entwicklung unkonventioneller Antriebskonzepte (FG Mikrotechnik bzw. Mechatronik – Prof. em. E. Kallenbach – jetzt Steinbeis-Transferzentrum Ilmenau) auf Grundlage systematischer Übertragung biologischer Prinzipien, bzw. bionischer Pump- und Medienförderungs-Prinzipien („Peristaltische Pumpe“), Erfahrungen in der Kooperation mit polymerwerkstofftechnisch und textiltechnologisch qualifizierten Partnern sind als Vorleistungen in den verschiedenen Arbeitsschritten vorzuweisen. Firmen wie die TETRA GmbH (Dr. A. Karguth), die LTF GmbH (Dr. T. Frank), sowie Höfer & Bechtel Mainhausen (DI Bechtel) als auch dem Textil-Institut TITV e.V. Greiz mit Dr. W. Scheibner waren Partner bei der Entwicklung zur Produktreife.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Aufgabenverteilung im Projekt war zuvor abgesteckt: das TITK war für die Herstellung der aktorischen Folien und Fasern, deren Metallisierung, Modifizierung sowie elektrische und mechanische Charakterisierung verantwortlich. Die TU Ilmenau übernahm die analytische Modellierung, den Entwurf und die körperliche Realisierung von Konstruktionsvarianten zur Kaskadierung der Aktor-Grundstrukturen von Konstruktionsvarianten möglicher Systemintegration und den Aufbau eines Demonstrators der Membranpumpe. Die sich für das Teilprojekt II ergebenden Arbeitspakete waren (für zeitliche Einordnung siehe Abb. b):

(9) = Verbund und Konstruktion; (10) = Modellierung/Simulation; (11) = Bewegungsumsetzung; (12) = Kaskadierung; (13) = Systemintegration; (14) = Demonstrator-Aufbau Membranpumpe und (15) = Identifikation von Anwendungsfeldern.

Sie enthielten einen unterschiedlichen Schwierigkeitsgrad, da sie von Sonderleistungen Anderer und der Verfügbarkeit von hochtechnologischer Austattung abhängig waren.
Die zu Beginn stehende Entwicklung der Verbundverfahren für die mechanischen und elektrischen Kopplungen setzte eine hinreichende Menge an funktionierendem Testmaterial voraus; ein Problem, welches durch zunehmende Probenlieferungen seitens des Partners in der Anlaufphase bewältigt wurde. Die Modellierung und Simulation, welche mit Unterstützung unseres wiss. Partners an der TU Budapest bearbeitet wurde, brachte sehr aufschlussreiche Ergebnisse hinsichtlich der in der Literatur nicht explizit beschriebenen sphärischen Verformung. Damit konnten Ursachen von Minderfunktionen bei einigen der vorgesehenen Design-Konzepte vor einem aufwändigen Musteraufbau vermieden werden.
Die Kaskadierung und Systemintegration war in starkem Maße von den Ergebnissen der Aufbau- und Verbindungstechnik abhängig und bewirkte unsererseits eine Priorisierung des flächigen, form- und kraftschlüssigen Substratverbundes hin zum komplexeren Aktor. Dieser Tatsache folgte eine intensive Entwicklungsleistung für den Demonstrator mit dem entsprechenden Erfolg. Viele Initiativen wurden in den Aufbau von Kontakten zur Nachnutzung der unmittelbar angestrebten als auch der Anwendung von weiteren erschlossenen Funktionen des Materials unternommen, um die Einsatzbreite des Forschungsergebnisses zu vergrößern, wobei sich unter den Beteiligten zwar jeweils großes thematisches Interesse einstellte, jedoch keine Bereitschaft hinsichtlich der Weiterentwicklung zur Produktreife entstand.
Die in der Planung festgelegten Arbeitsphasen und deren Zeitbedarf konnten im wesentlichen eingehalten werden, abgesehen von einer zuwendungsneutralen Laufzeitverlängerung von 4 Monaten, deren Grund in einer gewissen Anlaufzeit bei verschiedenen, teils internationalen Kooperationen lag, die eine wesentliche Weiterentwicklung in den Bereichen Zuschnitt, Kraftauskopplung und Ansteuerung versprachen.

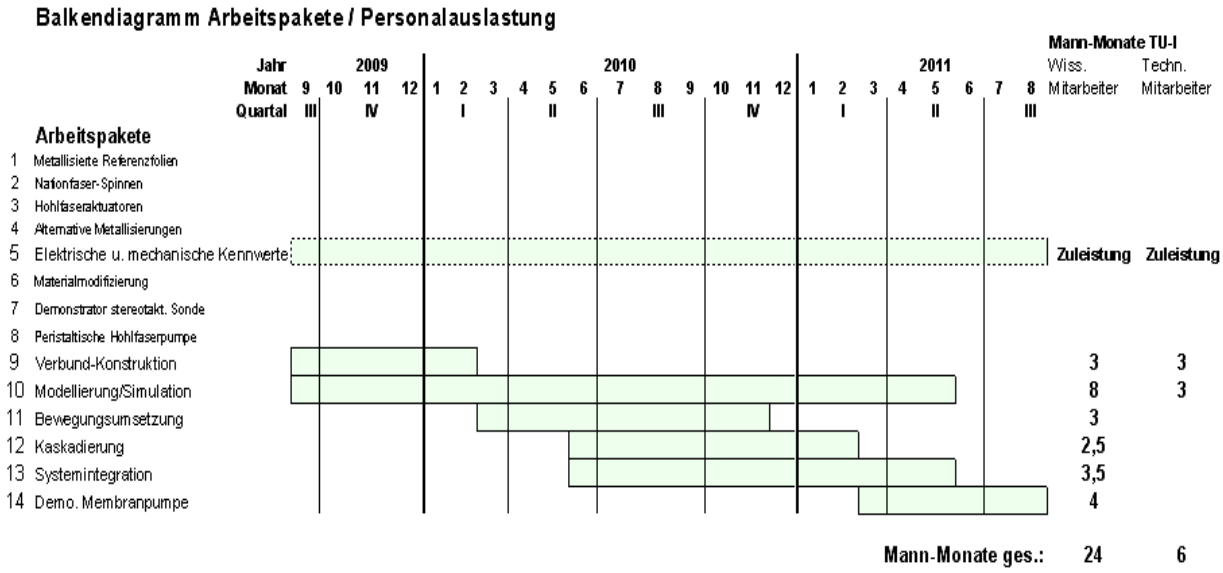


Abb. b: Monatsgenauer Zeitplan der Arbeitspakete Teilprojekt II (TU Ilmenau, FG Biomechatronik)

4. Wissenschaftlich-technischer Stand, an dem angeknüpft wurde

Neben den zum Antragszeitpunkt bestehenden eigenen Schutzrechten zum Gebrauchsmuster Nr. 20 2006 015721.2 „Peristaltische Pumpe mit textilgemantelten Schlauchwendeln“, der Offenlegungsschrift DE 199 12 606 A 1 „Pumpeinrichtung unter Verwendung eines elektrisch gesteuerten chemomechanischen Antriebs“; und dem Patent-Nr. 19724240. 5-15. „Peristaltische Mikroförderpumpe viskoser Medien“ gab es folgende

- **Bekannte Konstruktionen und Verfahren zur Durchführung des Projektes**

Es wurden das Pat. US 7394182 mit Patentinhaber SRI International 2006 und das Pat. WO 03081762 mit Inhaber SRI International 2002 ermittelt. Ersteres betrifft den Einsatz eines elektroaktiven Polymers zum Erzeugen eines Fluidstromes. Durch die zyklische Bewegung eines Polymerstreifens werden Fluidströmungen erzeugt. Dieser Pumpenaktor kann eingesetzt werden, um Wärmeströme zu erzeugen. Diese Bewegung des aktiven Materials wird dadurch erzeugt, indem eine wechselnde Spannung an das Polymer angelegt wird. Das zweite beschreibt eine oszillierende Kontraktion und Öffnung des aktiven Materials, wodurch ein Fluidstrom angesaugt und in Bewegung gesetzt, d.h., ein Druck erzeugt wird.

und:

- **Verwendete Fachliteratur (Auswahl), Informations- und Dokumentationsdienste**

Alle nicht aus Fachpublikationen (z.B.: Nemat-Nasser, S., Thomas, Ch. W.: Ionomeric Polymer-Metal Composites; Chap. 6 (San Diego / CF) bzw. “Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators” (Ed. Carpi, F.; Smela, E.; Publ. J. Wiley UK 2009) und Periodica, insbesondere den im Internet verfügbaren „WorldWide ElectroActive Polymers (Artificial Muscles) – EAP-Newsletters“ entnommenen Informationen wurden beim PATON - Landespatentzentrum Thüringen, Patentverwertungsagentur, PF 10 05 65, 98684 Ilmenau eingeholt.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der unmittelbaren Kooperation mit dem Projektpartner TITK Rudolstadt konnten Leistungen, Beratung und Technologien einiger inneruniversitärer Institute, insbesondere das Zentrum für Mikro- und Nanotechnik ZMN der TU Ilmenau und das Institut f. Werkstoffwissenschaften, einbezogen werden. Gegenstand waren hier die Herstellung und Charakterisierung von alternativen Metallisierungsverfahren. Mit den Fachgebieten Technische Mechanik und Mikromechanische Systeme wurden über Fragen der Modellierung der Biegekörper bzw. zukünftiger Applikation in Mikrofluidsystemen Beratungen eingeholt.

Der ebenfalls langjährige Forschungspartner an der TU Budapest im FG Feinmechanik u. Optik gab uns die Möglichkeit, Silikon-Abformungen für das Pump-Modul herzustellen.

Das Institut f. Werkstoffe und Fügetechnik Jena führte wichtige Tests zum Laserschneiden bzw. Laserschweissen aus.

Wie im Antrag vorgesehen, erstellten im Unterauftrag die Fa. LTF Ilmenau die Sandstrahl-Aufrauhungen der Materialproben, die Fa. K & S – Mechatronik Ilmenau die Ansteuerungsperipherie und die Fa. TETRA GmbH – Automatisierungstechnik/Robotik das an unsere spezielle Messaufgaben

soft- und hardwareseitig angepasste hochauflösende Tribometer. Damit konnten die Kraft-Weg-Kennlinien der Aktorproben in der Größenordnung der Feinmechanik aufgenommen und die Substrate der unterschiedlichen Bearbeitungen verglichen werden.

Mit den Forschungszentrum für Medizinische und Biotechnologie FZMB Bad Langensalza, dem Thür. Institut für Textiltechnik Vogtland (TITV– Kompetenzzentrum Medizintextilien) in Greiz, der Fa. für Automobil-Ausstattung Brose in Hallstadt/Franken, der Ges. f. Ökologie u. Umweltchemie ÖkoLab mbH Erfurt und dem Steinbeis-Transferzentrum Ilmenau wurden über Folgeentwicklungen und Applikationen ein intensiver Austausch geführt.

II Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung, Erreichen vorgegebener Ziele

Die Zielstellung der Antragsteller des Verbundprojekts enthielt die Entwicklung von faser- und folienförmigen Aktoren aus ionischen Polymer-Metallkompositen (IPMC), im konkreten Fall des Ionomers Nafion™, einem Fluorethylen-Polymer mit aliphatischen Sulfonsäure-Seitenketten. Dabei stand dessen aktorische Funktion mit der Realisierung verschiedener Bewegungsmodelle unter anderem von peristaltikähnlichen Bewegungen für die Applikation im Vordergrund. Hier sollen die spezifischen Vorteile der IPMC-Aktuatoren, insbesondere deren große Stellwege, die bei kleinen Spannungen generierbar sind, zum Tragen kommen. Parallel dazu sollte die Integrierbarkeit der konfektioniert verfügbaren Folienform als mechanisch aktive Membranen untersucht werden. Davon ausgehend wurden verschiedene Design-Formen des Aktors entworfen.
Um diese Ziele zu erreichen, war es erforderlich, die für die jeweils zu realisierende Bewegung benötigten Stellwege und Kräfte der Aktuatoren bei hinreichender Geschwindigkeit zu optimieren.
Zur Erzielung komplexer Bewegungen bzw. größerer Kräfte sollten Aktor-Elemente zur gemeinsamen Kraftausleitung zusammengeschaltet werden. Diese mechanische Kaskadierung von Einzelsubstraten konnte jedoch nur unter kraft- oder formschlüssiger Kopplung erfolgen. Ein zugfester stoffschlüssiger Verbund der Einzelsubstrate untereinander bzw. mit einem Fremdmaterial durch Klebung oder Verschweissung steht dem Chemismus des Materials entgegen. Grundsätzlich bei allen Fügeverfahren kann eine teilweise aufgezwungene Gegenbiegung (Inflexion) zu einem großen Leistungsverlust führen, den es durch entsprechende Konstruktion zu verhindern galt. Die Umsetzung der Biegebewegung in eine lineare Translation gelang jedoch durch die formschlüssige Kopplung der freien Enden der streifenförmigen Substrate mit einem stabförmigen Läufer, während die Gestellbefestigung auf einer kraftschlüssigen Kopplung beruhte.
Ein wesentliches Ziel war die Sicherung einer für Applikationen ausreichend großen Zyklenzahl (Lebensdauer), die durch die Beladung von bestimmten Substraten mit ionischer Flüssigkeit erreicht werden konnte. Der große Nachteil dabei ist aber die Verschmutzung der Integrationsumgebung, was wiederum einige Anwendungsfälle ausschließt, bzw. Schutzmaßnahmen notwendig macht.
Die gemeinsame Arbeit der werkstoff-wissenschaftlich bzw. mechatronisch orientierten Partner war in drei Stufen vorgesehen, die hier in einer vergleichenden Gegenüberstellung der wichtigsten Ergebnisse mit den Zielstellungen der Beantragung aufgeführt sind:

- Modifikation der stofflichen Komponenten: Metallisierung, Solventien, Diffusionsbarriere.
  Dabei konnte durch das Sputtern von Gold in sub-Mikrometerdicke nach definiertem Aufrauhen mittels mirco-corund-blasting („Sandstrahlen“) ein alternatives Metallisierungsverfahren erfolgreich eingeführt und getestet werden. Dabei muss zwischen dem geringeren Edelmetallbedarf und dem technologischen Aufwand bei größeren Stückmengen abgewogen werden.

- Formgebungs-Verfahren möglicher Grundgeometrien: Folie, Streifen, Faser, Hohlformen.
  Bisher hat sich das manuelle Stanzen als das Praktikabelste erwiesen, da sich im Gegensatz zum ziehenden Schnitt keine metallischen Materialverlagerungen ergeben, die beim späteren Betrieb Kurzschlüsse verursachen könnten. Der Zuschnitt mittels thermischen Lasers ist nur bedingt einsetzbar und stellt nur für gesputterte Substrate eine Lösung dar. Die Zuschnitte, die sich aus der grundsätzlich sphärischen Verformung (um beide Achsen einer Ebene) als mechanisch

effektiv erwiesen, waren einerseits der quadratische mit diagonalen Entspannungseinschnitten und peripherer Kraftauskopplung, andererseits ein zirkulärer mit trapezförmigen Biegezungen und zentrischer Kraftauskopplung.

- Daraus hatte die Erstellung von Verbundformen (aktive Membranen, Bündel, textile Flächengebilde) und deren Integration in Bewegungssysteme mit Kraftauskopplungs-Komponenten zu erfolgen. Prinzipiell wie beim Koppelsteg im Sarkomer-Modell erfolgte die Kraftauskopplung im zirkularen Modul über Formschluss, jedoch durch Kopplung mit passiven Membranen. Weitere Optionen wurden mit Polymer-„Vernietung“ oder unter Kraftschluss bei Einsatz von inerten Metallklemmen bzw. Mikromagneten erfolgreich getestet.

Arbeitsprogramm

Das Arbeitsprogramm umfasste sechs Schwerpunkte, die von der Herstellung der polymeren Ausgangsformen und deren Metallisierung bis hin zur Modellierung von Bewegungen bei Kaskadierung der aktorischen Elemente und deren Anwendungen in konkreten technischen Systemen reichte. Unter anderem wurden Verfahren wie die Maxtraq™-Video-Bahnverfolgung der Biegebewegung und die FEM-Analyse des zyklischen Verformungsverlaufs eingesetzt.
Die Bearbeitungsschwerpunkte der Entwicklung betrafen im Einzelnen:

- Durch die werkstoffseitige Weiterentwicklung unter Substitution von Wasser als Ionentransportmedium konnte seitens des Projektpartners eine für die Funktionsmodelle entscheidende Stabilität, jedoch noch ohne wesentlichen Zugewinn an Leistungsdichte, erreicht werden.
- Die Vervielfachung des Leistungsparameters Kraft des einzelnen Polymeraktor-Elements konnte durch das Sarkomer-Modell der Parallelschaltung von rechteckigen Biegestreifen im Prinzip bestätigt werden. Zudem erfolgt dabei eine Vergleichmäßigung der Arbeitsweise der individuellen Streifen.
- Die Realisierung einer (Mikro-)Pumpe auf Basis von peristaltischen Membranen soll die Sinnfälligkeit der Auskopplung der IPMC-Leistung demonstrieren. Ein membrangetriebenes Fördersystem aus einer Serie von membrangedeckten Kammern wurde als Funktionsmodell Pumpe zur Fluidförderung im µl-Maßstab vorgestellt. Bei einer sequentiellen Arbeitsweise (unterschiedliche Aktionszeiten sequenziell kombiniert) ergab sich eine kontinuierliche Tropfenfolge.

Dazu war innerhalb einer Aufgabenpräzisierung die zweckspezifische Formgebung der einzelnen Aktoren betreffend, eine Erzeugung gezielter Beschichtungsinhomogenitäten des Elektrodenmaterials (z.B. Variation in der Dicke) zur Modulation der Steifigkeit bzw. die Erzeugung von spezifischen Verteilungen des eingekoppelten elektrischen Feldes vorgesehen. Eine partielle Beschichtung beim Metall-Sputtern über eine Maske ist mit hinreichender Kantenschärfe möglich, während mit dem Abweichen aus der einfachen Streifengeometrie durch einen entsprechenden Zuschnitt die effiziente Feldverteilung generiert werden kann. Eine lokale Einstellung der Steifigkeit der Aktorfolie wurde durch die Konturverjüngung möglich, was einer Modulation der Schichtstärken vorzuziehen ist.
Parallel dazu konnte die Bestimmung materialcharakteristischer Größen, wie Stellweg, Leistungsdichte, Wirkungsgrad, Reaktionszeit, Zyklenzahl, Betriebsdauer im ständigen Austausch mit dem Partner TITK am Kraft-Weg-Meßsystem BASALT® erfolgen. Dadurch konnte die positive

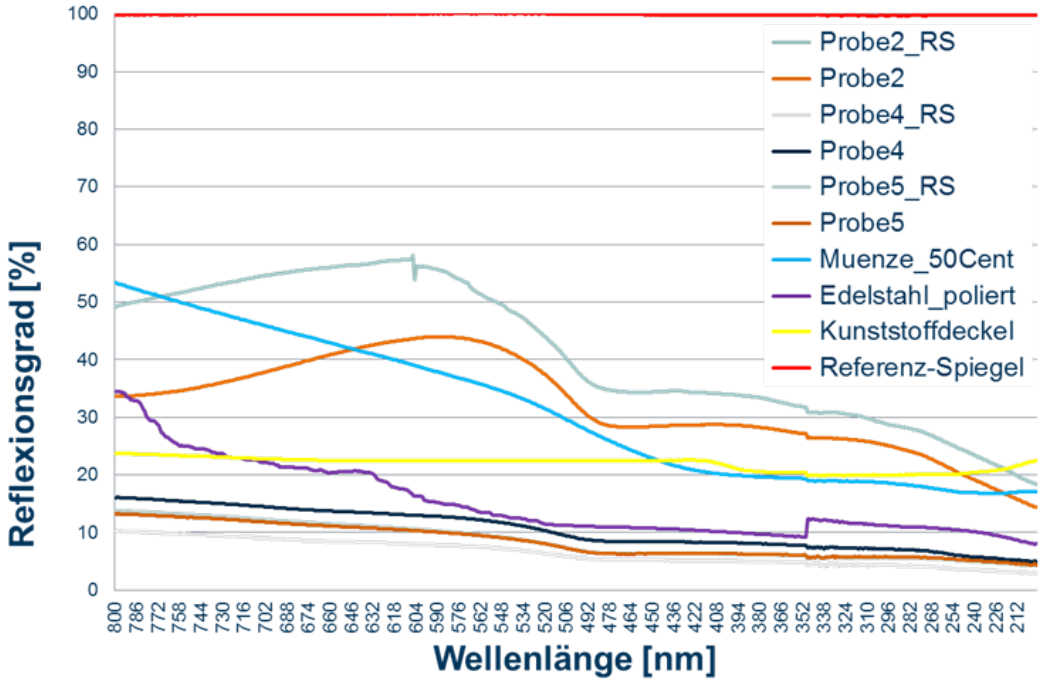
Entwicklung der Parameter beim Einsatz der duktileren Goldbeschichtung und der elektrolysefesteren Solventien dokumentiert werden.

1.1. Erzielte Ergebnisse im Einzelnen

1.2.1. Ermittlung optischer Eigenschaften von Rohmaterial und IPMC

Begründet auf der Tatsache, dass der Nutzleistungsanteil von IPMCs gering ausfällt, wurden Anwendungen in der Optik in Erwägung gezogen. Es wurden zusammen mit dem universitätsinternen Fachgebiet Technische Optik Transmissionsmessungen am Rohmaterial Nafion 117™ durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass unter Verwendung von reinem Wasser als Quellungsmittel die Absorption im Vergleich zu trockener Nafionfolie der Dicke 170 µm vollständig vernachlässigbar ist. Außerdem wurde festgestellt, dass sich das Material in diesem Zusammenhang anisotrop verhält.

Im Hinblick auf die mögliche Anwendung von IPMCs zur gesteuerten Führung sichtbaren Lichtes wurde der Reflexionsgrad von verschiedenartig metallisierten IPMCs untersucht, vgl. Abb. 1. Es wird deutlich, dass selbst bei den glänzenden Substraten der Reflexionsgrad nur mäßig ist und infolgedessen nicht direkt mit der vorhandenen Metallschicht gearbeitet werden kann.



Probe 2: 100nm Gold aufgesputtert (glänzend); **Probe 4:** Gold chem. reduktiv abgeschieden; **Probe 5:** 300nm Gold aufgesputtert, Vorbehandlung durch Sandstrahlen

Abb. 1: Reflexionsgrad in Abhängigkeit der Wellenlänge im Bereich des sichtbaren Lichtes für verschiedenartig metallisierte IPMCs

1.2.2. Vorbehandlung des Rohmaterials Nafion 117™ durch SiC-Micro-Sandblasting

Frühe Versuche bestätigten, dass vor dem Metallisieren aufgeraute Polymerfolien zu besseren IPMCs führen. Besser vor allem in Bezug auf die Haltbarkeit. Ein Grund für die starken Schwankungen in der Leistungsfähigkeit wird jedoch genau hier vermutet. Bisher war die Aufrauhung nicht definiert, sondern ein zufälliges Ergebnis. Mit der Hilfe der Firma LTF GmbH Ilmenau, die mehrere

Sandstrahlkabinen für die Strukturierung von Mikrofluidsystemen betreibt, wurde der Versuch unternommen, eine bestimmte, homogene Rauigkeit zu erzielen. Als Granulat diente unbenutztes Siliziumkarbid 180 mesh unter einem Druck von 2,5 bzw. 1,5 bar. Der generell verwendete Düsendurchmesser betrug dabei 8 mm, während sich die Düse im Abstand von 63,5 mm zum Werkstück befand. Das Verfahren zum Erreichen gleichmäßiger Abtragung war für die Projektbeteiligten nicht einsehbar, da es dem Betriebsgeheimnis unterliegt. Abb. 2 stellt den symmetrisch aufgebauten und drehbaren Spannrahmen als Halter für Polymerfolie dar, eine aufgeraute Polymerfolie ist in Abb. 3 dargestellt. Derart präparierte Probenserien wurden an den Projektpartner TITK zum Test der Metallisierung geliefert.

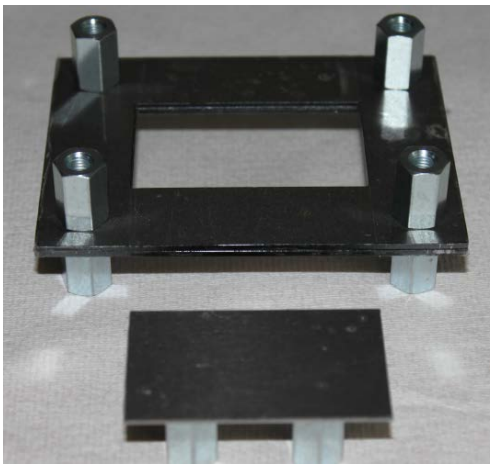


Abb. 2: Halter für Polymerfolie (Selbstherstellung)

Abb. 3: Aufgeraute Polymerfolie (rechter Teil)

Universitätsintern wurden Rauigkeitsmessungen zur quantitativen Bestimmung der erzielbaren Rauigkeiten mit einem Profilometer (Taylor Hobson Form Talysurf Series 2) vorgenommen, die Werte sind in Tab. 1 einsehbar. Einerseits wurde Ra, die durchschnittliche Rauigkeit der gesamten Messstrecke, andererseits Rz, der Maximalwert zwischen Spitze und Tal auf der Oberfläche, ermittelt. Die Art des Zusammenhangs zwischen Strahldruck und Rauigkeit konnte daraus nicht eindeutig abgeleitet werden. Viel wichtiger für eine homogene Aufrauhung ist, dass der Siliziumkarbidstrahl in jedem Bereich der Polymerfolie die gleiche Verweildauer erfährt und, dass das Granulat einen gleichbleibenden Schärfegrad besitzt.

Tab. 1: [2] Ermittelte Rauhigkeiten

Rauigkeiten in µm	Mittelwert bei 2,5 bar	Mittelwert bei 1,5 bar
Ra	0,3385	0,2852
Rz	1,7097	1,7905

1.2.3. Beschichtung der vorbehandelten Polymerfolie

Es wurden mehrere Beschichtungen hergestellt, die sich hinsichtlich der Wahl des Metalls, der Vorbehandlung und der Beschichtungstechnologie unterscheiden. Daraus wiederum resultieren unterschiedliche Charakteristika, insbesondere bei der Leistungskomponente Kraft, eine Auswahl dazu ist in Abb. 3* dargestellt.

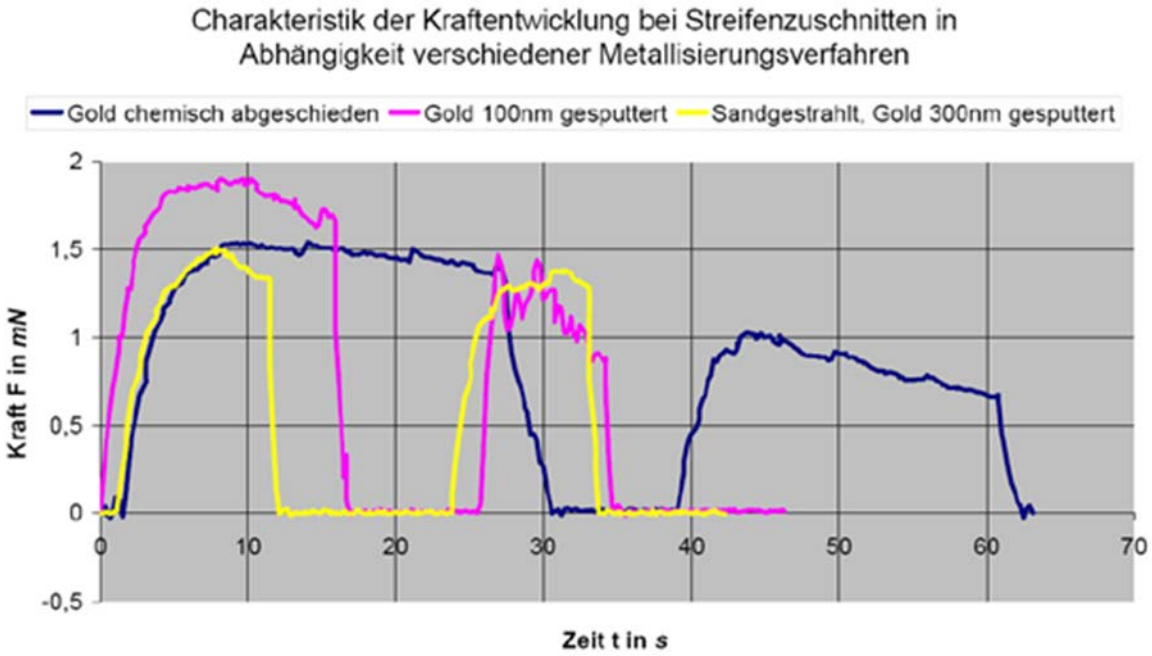


Abb. 3*: Charakteristik der Kraftentwicklung bei Streifenzuschnitten in Abhängigkeit verschiedener Metallisierungsverfahren

Die haltbarsten und leistungsstärksten IPMCs lassen sich insbesondere per chemisch reduktiver Abscheidung von Gold, aber auch durch Aufsputtern von Gold erreichen. Insgesamt wurden die folgenden Beschichtungsarten durchgeführt:

1.2.3.1. Aufpressen von Kupfer

Mithilfe einer Drehdornpresse wurde Kupferstaub unter einem Druck von ca. 2 kN/mm^2 in die Oberfläche eingepresst. Das Ergebnis ist in Abb. 4 dargestellt. Die anschließende Quellung dieses Substrates führt allerdings zur Ablösung der Kupferschicht, weshalb weitere Versuche mit edleren Metallen nicht durchgeführt wurden.

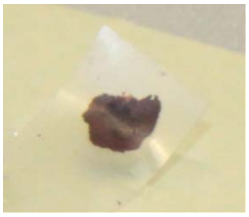


Abb. 4: Aufgepresste Kupferschicht

1.2.3.2. Galvanisches Abscheiden von Zink

Insbesondere die in Aussicht stehenden geringen Herstellungskosten, die von hoher Bedeutung bei der Etablierung von IPMCs im Massenmarkt sind, führten zu Tests im Bereich der Galvanik. Im Ergebnis ließen sich allerdings nur sehr starre Schichten erzeugen, die sich, sofern überhaupt eine Verformung eintritt, nach 1-2 Zyklen ablösen. Damit wird das IPMC unbrauchbar.

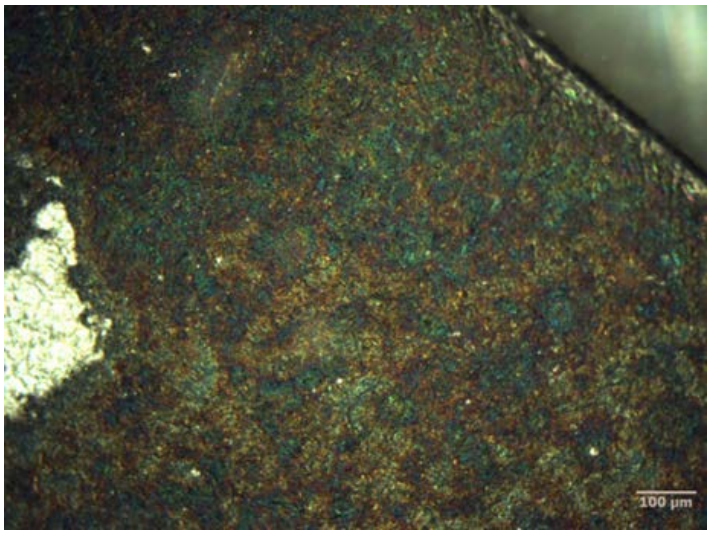


Abb. 5: Galvanisch abgeschiedene Zinkschicht

1.2.3.3. Aufbringen von Gold

Aufgrund seiner hohen Duktilität ist Gold das am besten geeignete Metall, um den starken Verformungen außerhalb des elastischen Bereiches einer Metallschicht auf dem IPMC zu begegnen. Des Weiteren ist es korrosionsbeständig, eine besonders wichtige Eigenschaft, wenn ein Betrieb in Anwesenheit von wässrigen Medien und elektrischem Strom vorgesehen ist. Nachfolgende Abbildungen zeigen stellvertretend für alle Metallbeschichtungen ein mit Platin beschichtetes IPMC vor und nach dem Test. Durch Risse steigt der elektrische Widerstand, das Verformungsverhalten ändert sich. Mit weiterem Fortschreiten der Rissbildung beginnt die Schichtzerstörung und teilweise Ablösung.

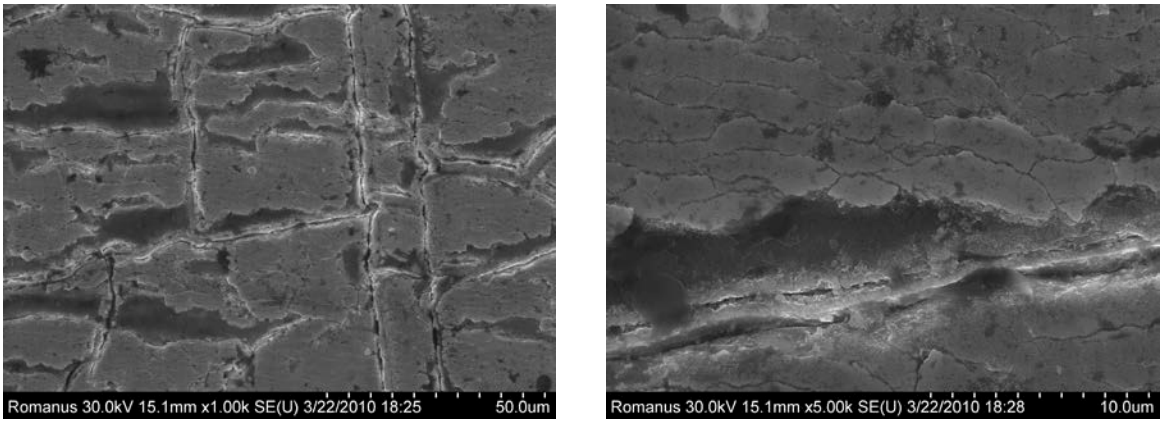


Abb. 6: Mit Platin beschichtetes IPMC vor dem Test

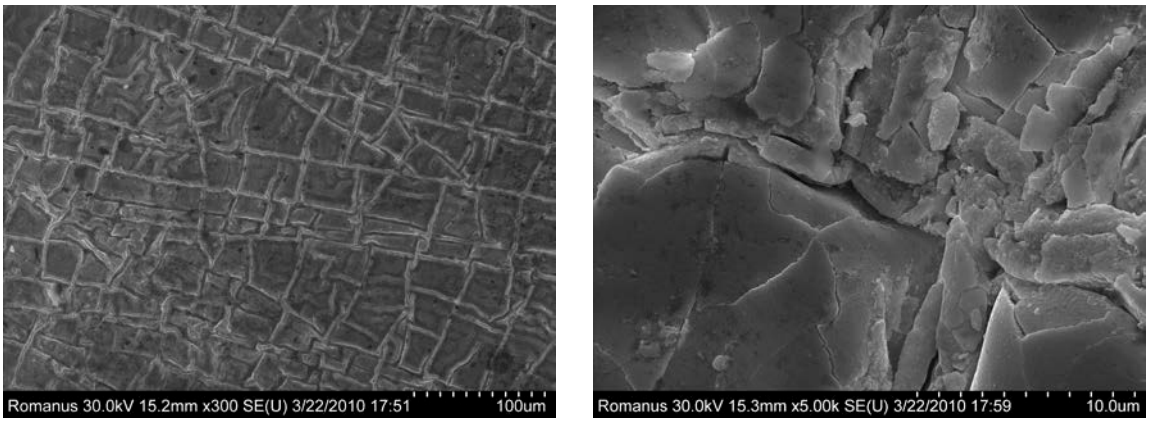


Abb. 7: Mit Platin beschichtetes IPMC nach dem Test

Sputtern von Gold

Eine Vielzahl der getesteten IPMCs wurde durch Sputtern hergestellt. Die wesentliche Beobachtung bei den Tests ist der hohe Grad an Homogenität sowohl über die verschiedenen Fertigungschargen als auch bezogen auf das einzelne Substrat hinsichtlich der Art der Verformung und den Leistungseigenschaften. Nachteilig ist die geringe Haltbarkeit, sie beläuft sich auf etwa 25 Zyklen. Dies ist auf die schwache Anbindung der Metallschicht an das Polymer und die 3mal höhere Quellausdehnung (Folge: Rissbildung in der Beschichtung) im Vergleich zur chemisch reduktiven Abscheidung zurückzuführen. Beim Betrieb mit dem Quellungsmittel Wasser zeigt sich zudem nach wenigen Zyklen eine elektrolysebedingte Ablösung der Beschichtung, insbesondere beim Test unter Wasser, vgl. Abb. 8.

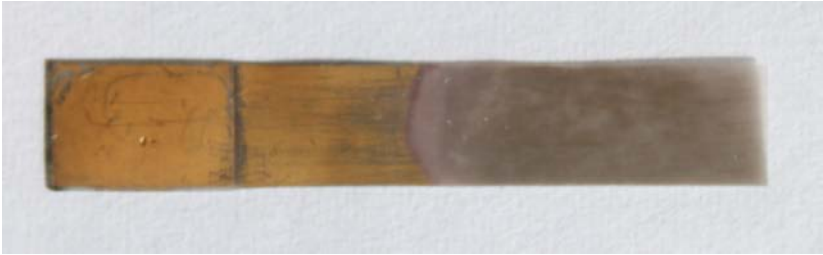


Abb. 8: Ablösung der Beschichtung; links: oberhalb; rechts: unterhalb einer Wasseroberfläche

Chemisch reduktives Abscheiden von Gold

Diese Art der Beschichtung liefert zwar im Vergleich zum Sputtern keine homogene Metallschicht aber die haltbarste Verbindung (ca. 10000 Zyklen) zwischen Metall und Polymer aufgrund der Verwurzelung, vgl. Abb. 9, der chemisch reduktiv generierten Schicht. Die Quellausdehnung ist geringer, wodurch die Beschichtung einer geringeren mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist. Insbesondere im Zusammenhang mit dem Quellungsmittel Wasser treten sehr große Schwankungen in der Leistungscharakteristik auf.

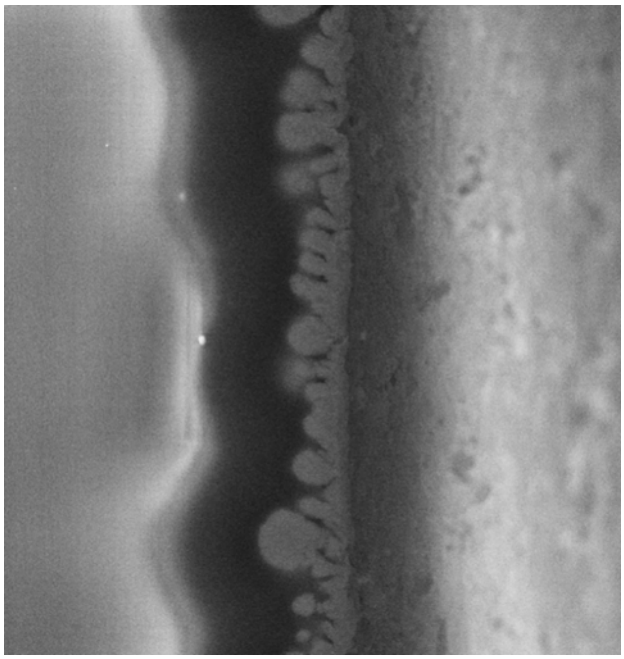


Abb. 9: Chemisch reduktiv abgeschiedene Goldschicht

1.2.4. Formoptimierung

Um die Leistungsdichte eines IPMCs zu erhöhen bzw. hohe Leistung auf ein kleines Areal zu konzentrieren, was die Auskopplung eines Nutzleistungsanteils begünstigt, bedarf es spezieller Formen. Ausgehend von der Rechteckform konnten die folgenden 2 Wege der Optimierung vorgenommen werden.

1.2.4.1. Formoptimierung von IPMC-Material nach klassischen mechanischen Gesichtspunkten

Im Zuge der Verbesserung der Leistungsfähigkeit, insbesondere aufgrund der Einsparung von Massen wird in vielen Bereichen des Maschinenbaus auf eine etablierte Methode der Mechanik zurückgegriffen, bei der es um die belastungsgerechte Gestaltung von Bauteilen z.B. Trägern geht (sog. **S**oft-**K**ill-**O**ption). Im klassischen statischen Fall mit einer Einspann- und einer (angenommen diskreten) Krafteinleitungsstelle (vgl. Abb. 10), führt die Optimierung stets zu einem sich zur Krafteinleitungsstelle verjüngenden Profil.

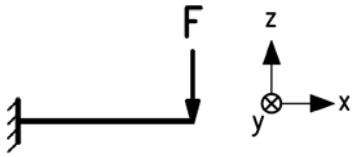


Abb. 10: Träger in einer Einspannung

Geht man von einem Rechteckprofil (betrachtet in x-Richtung) aus, welches beim in den meisten Publikationen am häufigsten dargestellten Testobjekt „Rechteckstreifen des Nafion™117-Materials“ die Grundlage bildet, kann dabei sowohl die Höhe h, als auch die Breite b des Trägers variiert werden. Ein solcher Streifen besitzt jedoch eine urgeformte Materialdicke h von 180 µm. Daher bleibt nur noch die Variation der Breite b, um anhand der Beziehung lt. (1) in Abhängigkeit der Stelle

x zwischen Einspann- (x=0) und Krafteinleitungsstelle (x=max.) sowie der maximal ertragbaren mechanischen Spannung eine belastungsbezogene Gestaltung vorzunehmen.

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} \leq \sigma_{bzul} \qquad (1)\ [1]$$

$$\sigma_b = \frac{6F(l-x)}{bh^2} \leq \sigma_{bzul}$$

$$b \geq \frac{6F(l-x)}{\sigma_{bzul}h^2}$$

Die maximal ertragbare mechanische Spannung eines Streifens ist von vielen Faktoren abhängig und zum gegenwärtigen Zeitpunkt über die Produktionschargen, vermutlich schon vom Rohmaterial ausgehend, aber mit Sicherheit bedingt durch die verschiedenen Prozesse der Metallisierung unterschiedlich. Gleichermaßen ist eine Inhomogenität über die Fläche des Streifens zu erwarten, was sich in einem ortsabhängigen Wert für die maximal ertragbare mechanische Spannung äußert. Das bedeutet, dass diese Vorgehensweise eher tendenzielle Aussagen zulässt, als dass sie eine bedingungslose Optimierung darstellt. Für die hier angestrebte belastungsgerechte Formoptimierung sollen Inhomogenitäten ausgeschlossen werden. Um zum Ergebnis zu gelangen, ist der Wert für die maximal ertragbare Spannung nicht von Belang. Es soll jedoch beispielhaft ein Wert genannt werden, der mit einem leistungsfähigen Streifen aufgenommen wurde, vgl. Abb. 11.

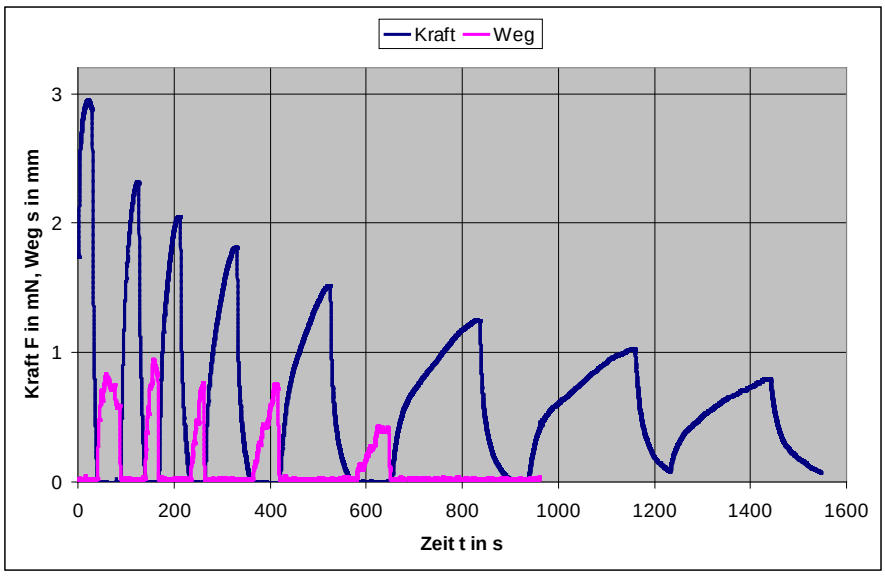


Abb. 11: Dynamisches Verhalten eines chemisch-reduktiv metallisierten IPMC-Rechteckstreifens (Laborcode AW47v)

Der Mittelwert der maximalen Kraft über die ersten 5 Zyklen, die bei 3 V elektrischer Spannung aufgenommen wurden, beträgt ca. 0,0022 N. Bei einer freien Streifenlänge von 20 mm ergibt sich daraus ein Moment an der Einspannstelle von 0,044 Nmm und somit lt. (1) eine maximal ertragbare mechanische Spannung von **1,63 N/mm²**.

Der Zusammenhang lt. (1) ist linear, wenn nach der Breite bei konstanter Höhe umgestellt wird, d.h. die sich ergebende optimierte Form unter Eliminierung passiv bleibender Bereiche wäre ein gleichschenkliges Dreieck, vgl. Abb. 12.

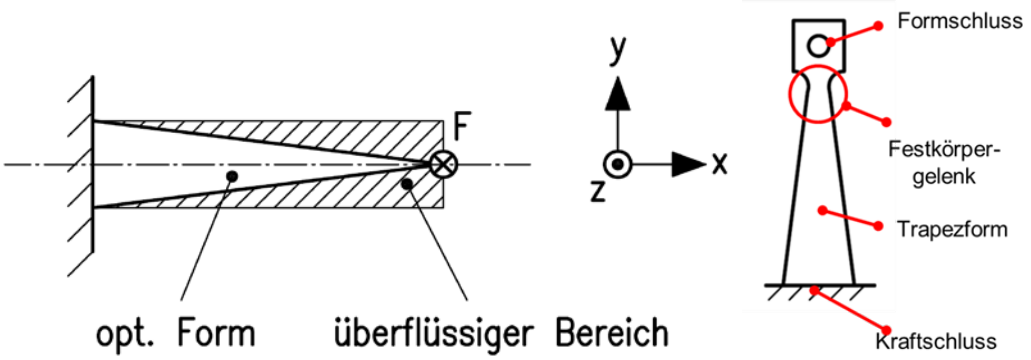


Abb. 12: links: Formoptimierung lt. (1); rechts: Beispiel für eine praktische Umsetzung

In der Simulation sowie auch in der Realität beobachtbar ist die sphärische Biegung des Materials. Ein quadratischer Streifen würde also als Sonderfall des rechteckigen Streifens aus zwei Richtungen betrachtet jeweils das gleiche Ergebnis liefern. Für Länge l (parallel zur x-Richtung) >> Breite b bedeutet die sphärische Biegung jedoch den Wechsel vom Rechteckprofil zum U-Profil mit einem größeren Widerstandmoment gegenüber Biegung. Dies kann durch das Einbringen von Schlitzen in das Material, eingearbeitet im radialsymmetrischen Zuschnitt, vgl. Abschnitt 5, zu großen Teilen unterbunden werden.

1.2.4.2. Formoptimierung von IPMC-Material nach elektrischen Gesichtspunkten

In mehreren Versuchsreihen trat durch die Leitungswiderstände ein elektrisches Versorgungsproblem auf, da die Metallschichten keine idealen Leiter ergeben. Je größer die Entfernung zur Einleitungsstelle der elektrischen Energie wird, desto weniger potenziell aktive Areale können versorgt werden. Unter Zuhilfenahme des in Abb. 13 (links) dargestellten elektrischen Ersatzschaltbildes, konnte mit experimentell ermittelten Werten für Widerstand und Kapazität eine Formoptierung für unterschiedliche Streifenlängen lt. Abb. 13 (rechts) vorgenommen werden.

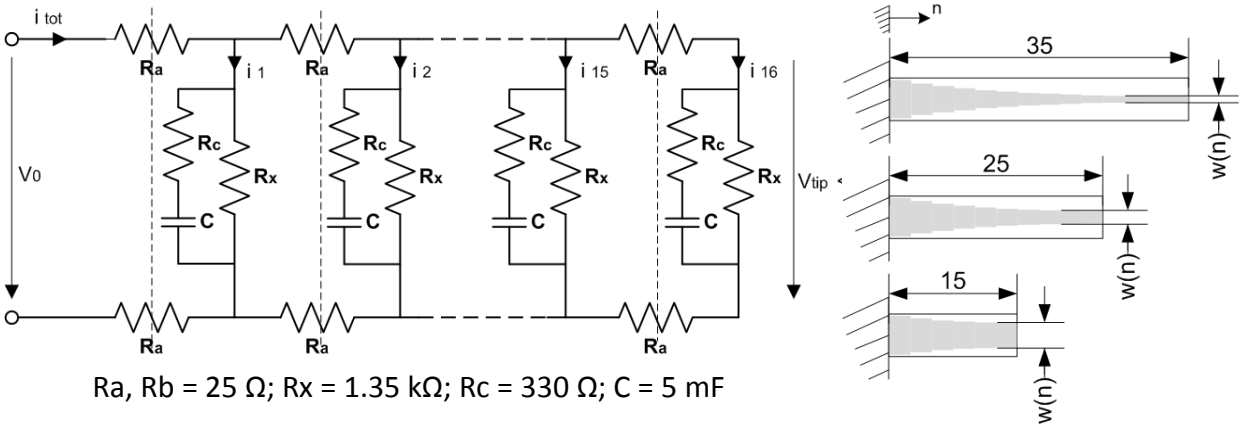


Abb. 13: links: elektrisches Ersatzschaltbild; rechts: Silhouetten der Formoptimierung

Diese elektrische Formoptimierung entspricht einem beidseitig konkaven Dreieck-Zuschnitt und lässt sich gut mit der mechanischen Formoptimierung vereinbaren. Der Praxistest beweist eine leichte Erhöhung der Auslenkung unter Beibehaltung aller Randbedingungen, siehe Abb. 14.

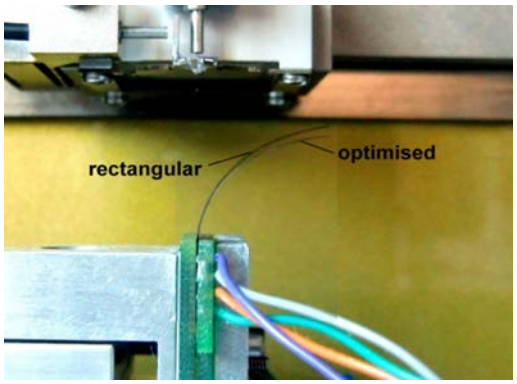


Abb. 14: Vergleich des Verformungsverhaltens eines rechteckigen mit einem formoptimierten Zuschnitt

1.2.5. Kaskadierung

Eine weitere Form der Steigerung des Nutzleistungsanteils ist die Kaskadierung, d.h. eine parallele oder serielle Kopplung mehrerer IPMCs zu einem Aktorgebilde. Bleibt die Leistungskomponente Auslenkung konstant und vervielfacht sich die Kraft, so kann man von einer parallelen, umgekehrt von einer seriellen, Kaskadierung sprechen. Generell problematisch war jeweils das Defizit an Kraft, weshalb hauptsächlich nach Lösungen zur Kraftsteigerung, d.h. im Bereich der parallelen Kaskadierung gesucht wurde. Bevor die Formoptimierungen auf Basis der Rechteckform vorgenommen wurden, entstand das Malteserkreuz lt. Abb. 15, ursprünglich um die zu Grunde liegende sphärische Verformung zur Wirkung kommen zu lassen, die ohne die 4 Schlitze durch interne, entgegen gerichtete Materialspannungen (Folge: Selbsthemmung) undefiniert abläuft und zu unbrauchbarer Verformung führt.

Abb. 15: links: Bewegung des Malteserkreuzes; mittig: Bewegung des Malteserkreuzes mit inverser elektrischer Polung; rechts: Simulation des Malteserkreuzes

Unter den Gesichtspunkten

- Ergebnis der Optimierungen auf Basis der Rechteckform
- Verhinderung der ruckartigen Überwindung der Totpunkte beim Wechsel der Bewegungsrichtung
- Beibehaltung der massiven Kopplung (Verzicht auf nachträgliche Fügungspunkte)
- großflächige Einleitung der elektrischen Energie (Versorgungsproblem) über die Einspannung und
- Konzentration der mechanischen Leistung auf einen Punkt

entstand der radialsymmetrische Zuschnitt lt. Abb. 16 und 17, der weiteren Optimierungsschritten unterlag.

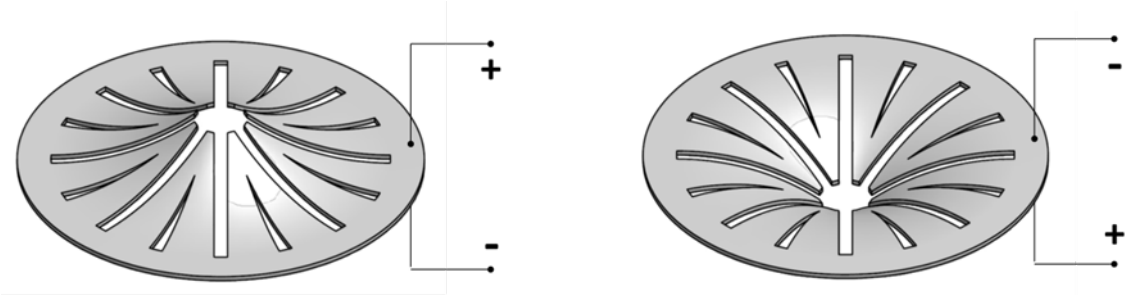


Abb. 16: radialsymmetrischer Zuschnitt unter Einfluss elektrischer, unterschiedlich gerichteter Gleichspannung

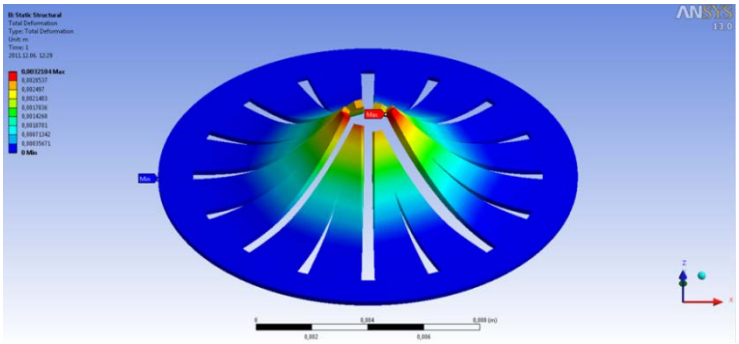


Abb. 17: Simulation des Bewegungsverhaltens des radialsymmetrischen Zuschnitts

Wesentlich kraftsteigernd im Zusammenhang mit der Nutzleistungsauskopplung hat sich dabei die Skalierung im Maßstab 2:1 ausgewirkt. Der Grund dafür liegt in der im Verhältnis zur Streifenlänge erhöhten Streifendicke. Gleichermaßen könnte man die Länge konstant lassen und die Materialdicke erhöhen. Allerdings wäre dabei die Metallschicht einer höheren mechanischen Spannung ausgesetzt und es ist mit einem erhöhten Zeitaufwand für die Verformung aufgrund der Gesetzmäßigkeiten bei der Diffusion der Ionen im Polymer zu rechnen. Gegenüber der ursprünglichen Form gewinnt die skalierte Version an aktivem Material durch minimale Breite der Entlastungsschlitze. Die Gefahr eines elektrischen Kurzschlusses ist hierbei nicht mehr vorhanden, so dass die ursprünglichen breiten Aussparungen zum Brechen der sphärischen Verformung durch einfache Einschnitte ersetzt werden können. Ohne diese Schlitze tritt Selbsthemmung auf, die sich innerhalb des Streifenquerschnitts durch den Wechsel vom Rechteck- zum U-Profil einstellt, was das Flächenträgheitsmoment steigert, insbesondere dann, wenn es sich um eine bogenförmige (Ringkontakt) Einspannung an der Basis anstelle einer geradlinigen handelt, was hier der Fall ist.

1.2.6. Formgebung

Zur Herstellung des durch mehrere Optimierungsschritte in der Form nun komplexen IPMCs wurden 2-dimensional arbeitende und im Bereich der Fertigungstechnik etablierte CNC-Trennverfahren in Erwägung gezogen. Wasserstrahlschneiden kommt nur dann in Betracht, wenn das verfahrensspezifische Bad, sowie die gesamte Peripherie frei von Verschmutzungen ist, da ansonsten, bedingt durch Quellfähigkeit des Polymers, die Zerstörung vorprogrammiert wird. Ein Test war aus diesem praktischen Grund nicht möglich. Fräsen als Option eignet sich nur dann, wenn sich der Radius des Fräsers mit der IPMC-Geometrie vereinbaren lässt.

1.2.6.1. Schneidversuche mittels Lasertechnik

Unter Auftragsarbeit einer für spezielle Laserschneidaufgaben renommierten Firma stellte sich heraus, dass die CO_2-Laserschneidtechnik für metall-besputterte IPMCs erfolgreich, jedoch für chemisch-reduktiv hergestellte IPMCs schlecht einsetzbar ist. Die Gründe hierfür liegen in der hohen thermischen Belastung der Schnittkanten bei tief eingedrungener Metallisierung, woraus starke Abschrägung und bei filigranen Zuschnitten eine deutliche Reduzierung der oberen Polfläche eintritt. Derartig zugeschnittene IPMCs waren nur partiell funktionsfähig, da durch Verschmelzungen von Metall und Polymer die elektrische Poltrennung nicht sichergestellt war. Eine Zusammenarbeit mit dem Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH (IFW) Jena führte zu dem Ergebnis, dass aufgrund der geringen Absorption des Polymers auch mit ns- und ps-Impulslaser-Anlagen und entsprechenden Wellenlängen das Laserschneiden nicht erfolgreich ist. Dabei wurden Versuche mit einem ns-Faserlaser (1064 nm, 100 W) und einem ps-Laser (1064 und 355 nm, 18 W) durchgeführt. Der Abtrag der Metallschicht hingegen hat in beiden Fällen funktioniert und ist präzise machbar, so dass sich hieraus anderweitig brauchbare Anwendungen, wie z.B. die elektrische Sektorierung für eine partielle Beschaltung, ergeben. Abb. 18 zeigt Schnittkanten eines chemisch-reduktiv hergestellten IPMCs, die mittels eines CO_2-Lasers vorgenommen wurden, Abb. 19 die mit verschiedenen Intensitäten der ns- und ps-Laser vorgenommenen Materialabtragungen.

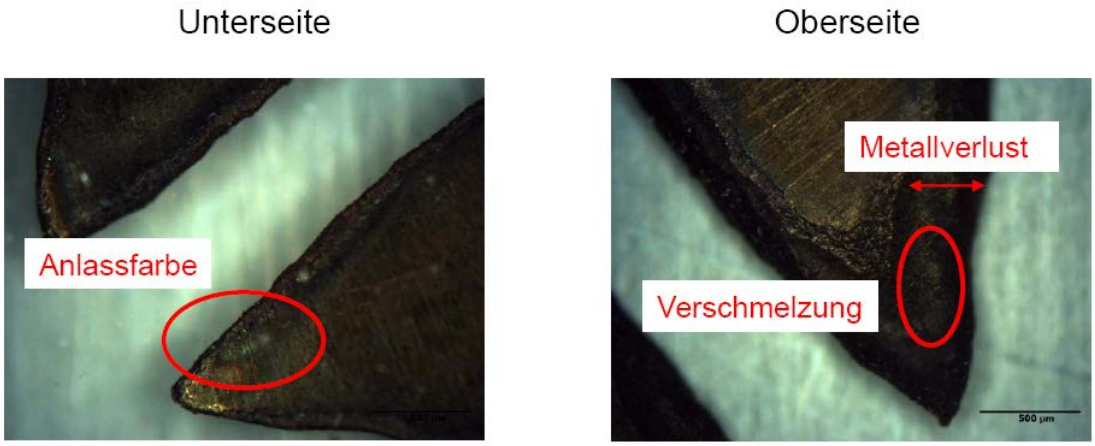


Abb. 18: Schnittkanten bei Verwendung eines CO_2-Lasers

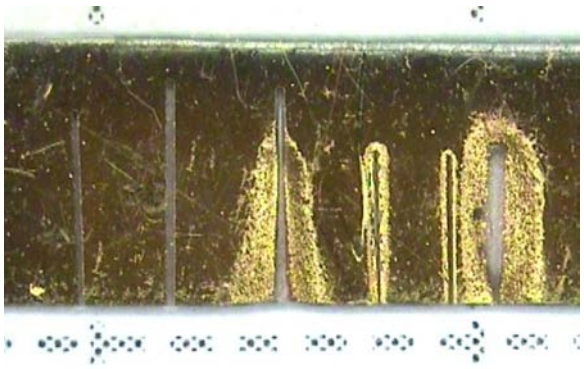


Abb. 19: [3] von rechts nach links, 1-3: ns-Faserlaser; 4-6: ps-Laser

Als einzig unproblematische Technik zur Formgebung stellte sich das Stanzen heraus. Im Gegensatz zum anfänglichen Schneiden durch Ziehen einer Klinge mit dem Nachteil des Materialversatzes,

gelingen saubere Trennungen durch das Stanzen. Für größere Serien kann ein spezielles Stanzwerkzeug eingesetzt bzw. das manuelle Stanzen durch maschinelles ersetzt werden.

1.2.7. Kontaktierung

Eine Kontaktierung kann lt. Tab. 2 in 3 Typen unterteilt werden: elektrisch, mechanisch und elektromechanisch. Tab. 2 stellt außerdem die dauerhaft realisierbaren Kontaktierungstypen dar (Kreuze). Im Sinne der Haltbarkeit müssen alle Typen den Anforderungen: Korrosionsbeständigkeit, hohe Maßtoleranz (Quellausdehnung) und gute Anhaftung genügen. Bei elektrischer und elektromechanischer Kontaktierung kommt die Anforderung der elektrischen Leitfähigkeit hinzu. In manchen Fällen kann äußerst geringe Eigenmasse erforderlich sein. Ausgehend von den allgemein bekannten 3 Verbindungsprinzipien: kraftschlüssig, formschlüssig und stoffschlüssig, vgl. Tab. 2, wurden verschiedene Varianten ausprobiert.

Tab. 2: Kontaktierungstypen und Verbindungsprinzipien

	elektrisch	mechanisch	elektro-mechan.
kraftschlüssig	x	x	x
formschlüssig	-	x	-
stoffschlüssig	-	-	-

Jegliche reine Kleb- oder Lötverbindungen wurden während des Quellvorgangs bzw. während der ersten Betriebszyklen zerstört. Stoffschlüssige Verbindungen sollten, sofern sie nicht massiv, d.h. als stoffliche Urformung, ausführbar sind, per Hochfrequenzschweißtechnik generiert werden, was sich allerdings mit den vorhandenen Mitteln als nicht machbar erwies. Ein miniaturisiertes Kraft- und Formschlussprinzip stellt das „Nietkleben“ lt. Abb. 20 dar. Der Kraftschluss wird durch Magnete aufrechterhalten, während eine Verdrehung per Formschluss über die nicht elektrisch leitfähigen „Silikonniete“ ausgeschlossen werden kann. Selbst eine derartig miniaturisierte Ausführung ist, egal, ob sie die elektrische Versorgung übernimmt oder als mechanische Verbindung dient, im Abtriebsbereich des IPMCs noch von zu hoher Masse als, dass es die Verformung nicht verhindert. Kinematisch betrachtet ist in nahezu jedem Fall der erwünschten Systemintegration ein Gestell vorhanden, an dem die Gegenkraft zu der, durch das IPMC erzeugten, Kraft gelagert wird und worüber gleichzeitig bequem die elektrische Versorgung vorgenommen werden kann. Es kann daher von weiteren, der elektrischen Versorgung dienenden, Verbindungen abgesehen werden, sofern kein Versorgungsproblem im Zusammenhang mit der Streifengeometrie auftritt. Das Versorgungsproblem wiederum kann aber eleganter über die Streifengeometrie selbst gelöst werden.

Abb. 21 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer kraftschlüssigen, elektromechanischen Gestellanbindung. Auf Leiterplattenmaterial wurde eine Goldschicht in Form eines großflächigen Ringkontaktes zur optimalen elektrischen Versorgung aufgebracht. 2 dieser Kontaktplatten ergeben eine Aufnahme für den unter Abschnitt 5 beschriebenen radialsymmetrischen Zuschnitt und sind zwecks Kaskadierung stapelbar. Der gleiche Verbindungstyp lässt sich problemlos auch auf andere Geometrien anwenden.

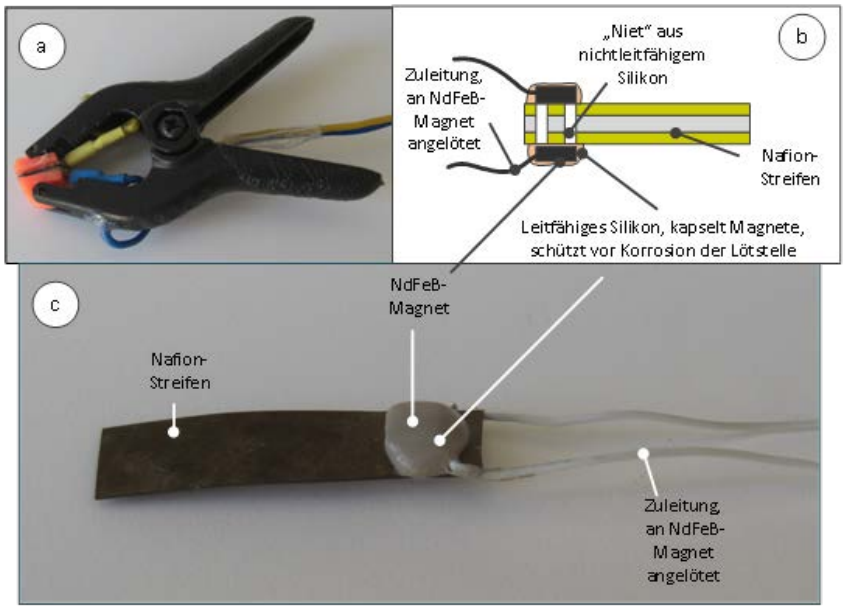


Abb. 20: Nietklebverbindung

Abb. 21: Kraftschlüssige Verbindung für den radialsymmetrischen Zuschnitt

1.2.8. Quellungsmittel

Der Einsatz von reinem Wasser ist charakterisiert durch gute Verfügbarkeit und unproblematische Handhabung, während bei der Verwendung von ionischen Flüssigkeiten bereits spezielle Methoden zum Quellen und Sicherheitsvorschriften im Umgang erforderlich sind. Während Wasser bei jeglicher Art metallisierten Substrates benutzt werden kann, führt der Einsatz von ionischen Flüssigkeiten z.B. bei gesputterten Substraten schon beim Quellvorgang zur Zerstörung.

1.2.8.1. Deionisiertes Wasser

Die höchsten Absolutwerte der Leistungskomponenten wurden mit Wasser erreicht. Allerdings führt der Betrieb mit Wasser früher zum Verschleiß der IPMCs, da sich wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, eine Zerstörung der Beschichtung vollzieht. Nachteilig wirkt sich auch das Nachquellen, das sich aufgrund des Verbrauchs von Wasser ergibt, aus, da hierbei feinste Partikel von bereits abgelöster Beschichtung in das Polymer eingesogen werden und die Leistungsfähigkeit beeinträchtigen. Da der Verlust von Wasser ein dynamischer Vorgang ist und die Leistungscharakteristik vom Wasserhaushalt abhängt, entsteht ein unstabiles, nicht vorhersehbares Leistungsverhalten.

1.2.8.2. Ionische Flüssigkeiten

Aufgrund der Probleme bei der Verwendung von Wasser, die auf Elektrolyse und Verdunstung zurückzuführen sind, wurde angestrebt, es durch Ionische Flüssigkeiten zu ersetzen. Der Einsatz von

BMI BF_4 führte zum Erfolg, birgt jedoch einige Besonderheiten. Die mechanischen Leistungskomponenten Kraft und Stellweg werden um ca. 50 % im Vergleich zu Wasser reduziert und die Verformungszeit steigt an. Es muss zudem eine Einlaufphase berücksichtigt werden, in der das IPMC erst die volle Leistungsfähigkeit entwickeln muss, vgl. Abb. 22. Am Ende jeder Einlaufphase ist ein Quellungsmittelaustrieb, wie in Abb. 23 (links) dargestellt, zu beobachten, der nach etwa 2 Stunden ohne Anliegen elektrischer Spannung wieder vollständig vom IPMC absorbiert wird, siehe Abb. 23 (rechts). Dieser Austrieb wirkt sich nachteilig für jegliche mechanische Anbindung aus. Da sich die Ionische Flüssigkeit aber im Gegensatz zum Wasser nicht verbraucht und es keine Elektrolyse gibt, muss weder nachgequollen werden, noch unterliegt die Beschichtung einer vergleichbar starken Erosion. Insgesamt ist damit ein stabiles, dauerhaftes Leistungsniveau erreichbar.

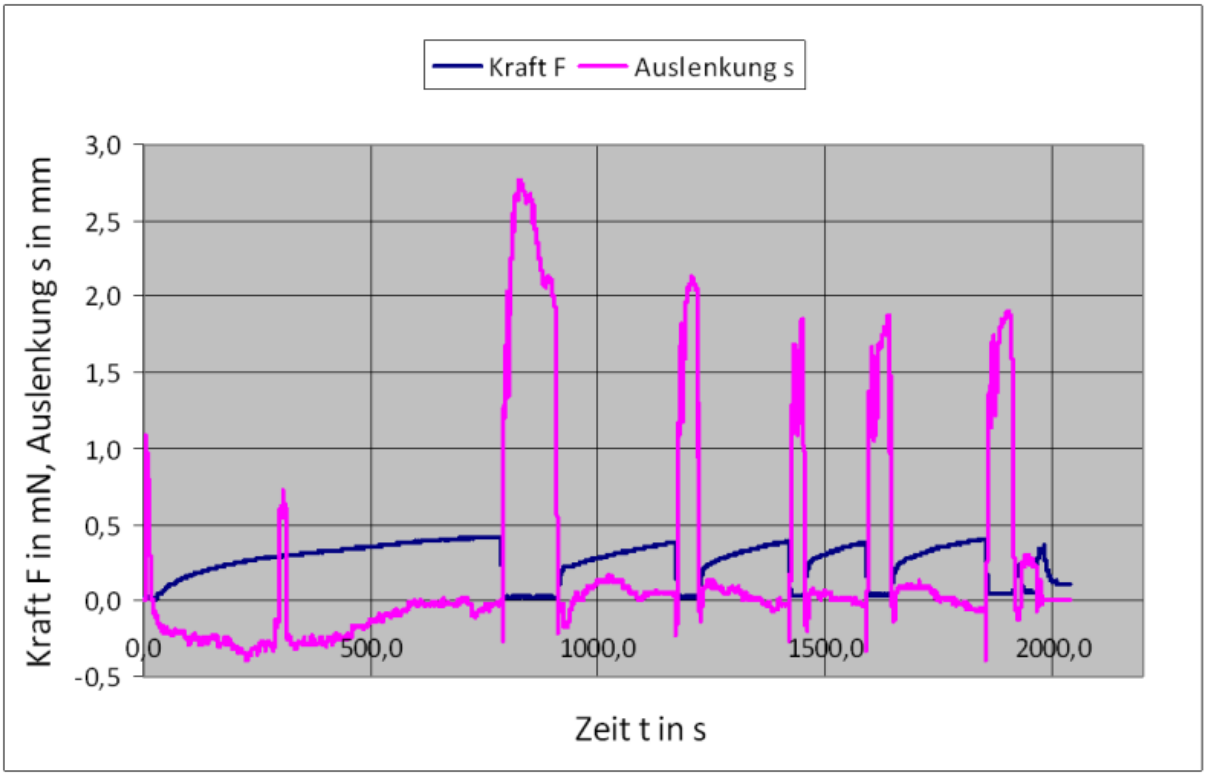


Abb. 22: Einlaufphase eines IPMCs mit BMI BF_4

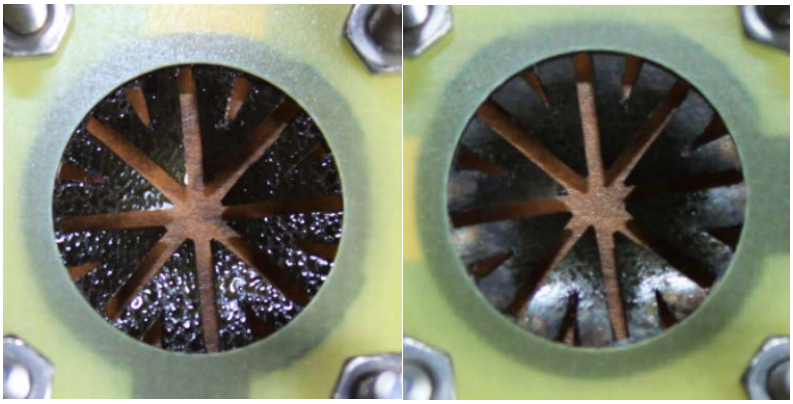


Abb. 23: links: Quellungsmittelaustrieb am Ende der Einlaufphase; rechts: Selbiges IPMC 2 Stunden später

1.2.9. Bestimmen der Leistungscharakteristik verschiedener Substrate

Mithilfe des Messgerätes BASALT MUST® (Fa. Tetra GmbH), einem laserbasierenden zusätzlichem Distanzmessgerät sowie peripherer Rechentechnik konnten die Leistungsdaten gemessen und aufgezeichnet werden, vgl. Abb. 23*.

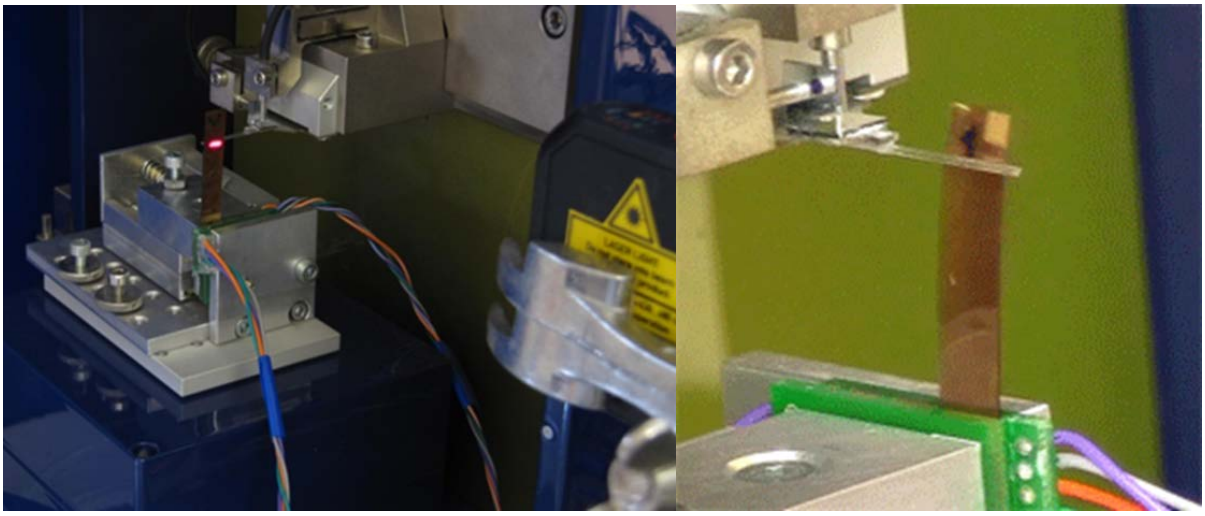
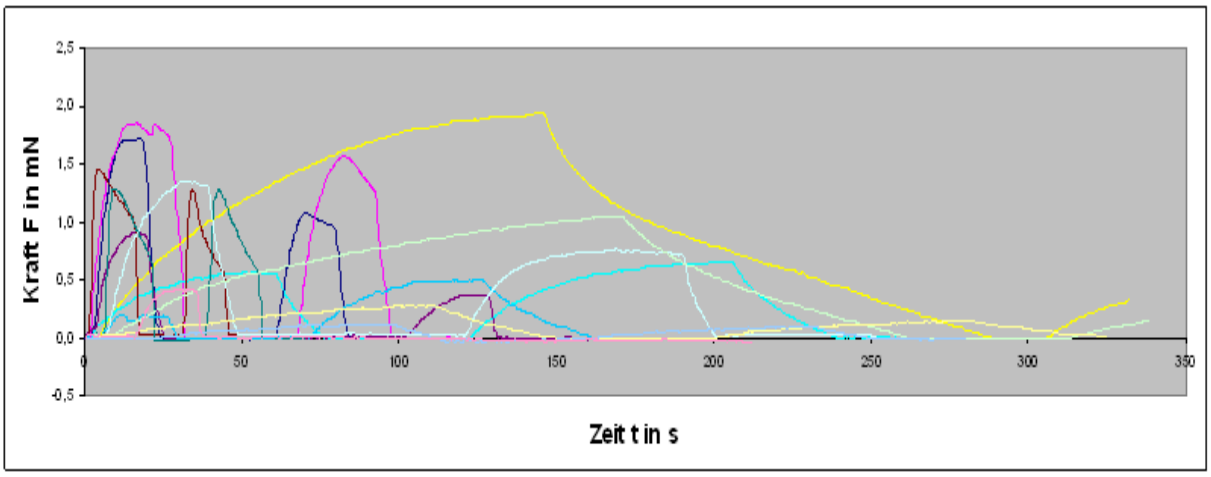


Abb. 23*: links: IPMC im Messschlitten; rechts: Detailaufnahme der Kontaktzone zwischen IPMC und Messnadel

Die anfänglichen, festen Polungsintervalle wurden später durch flexible ersetzt. Der Grund dafür ist, dass einige der chemisch reduktiv hergestellten Substrate erst nach Minuten deutliche Verformungen zeigen bzw. messbare Kräfte entwickeln. Der Zeitraum zum Erreichen des Spitzenwertes eines Leistungsparameters differiert hochgradig, insbesondere bei der Verwendung von Wasser als Quellungsmittel. Die Umpolung erfolgte immer dann, wenn für Sekunden kein weiterer Anstieg eines Leistungsparameters in der fünften Nachkommastelle ausgehend von der Grundmaßeinheit erfolgte. Zur Verdeutlichung der Bandbreite an Eigenschaften sind in Abb. 24 die Kraft- und Wegkennlinien verschiedener Substrate über der Zeit aufgetragen.



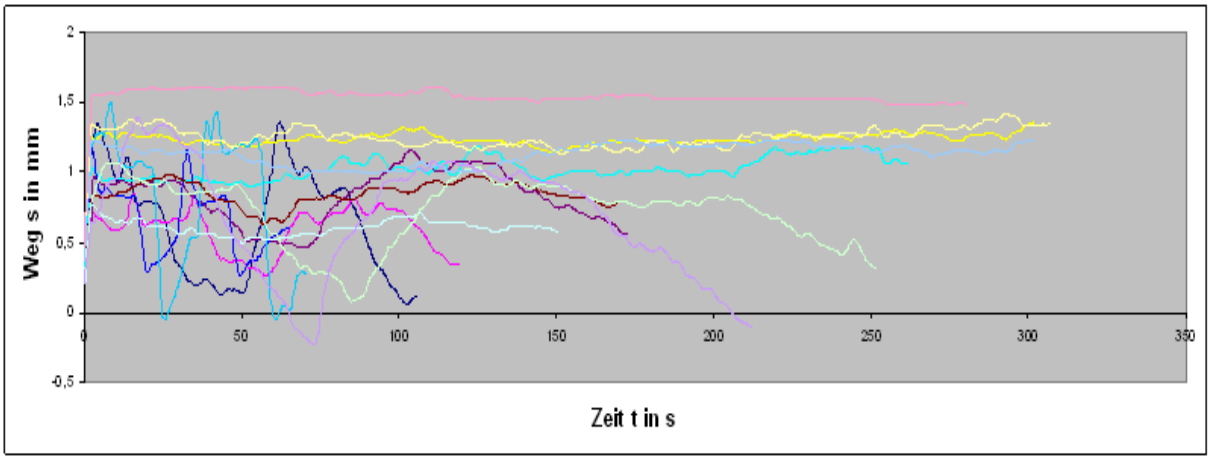


Abb. 24: oben: Kraftkennlinien verschiedener, chemisch reduktiv hergestellter Substrate mit dem Quellungsmittel Wasser; unten: Wegkennlinien selbiger Substrate

Somit konnten, speziell nach Einführung der ionischen Flüssigkeit BMI BF_4 in Verbindung mit dem chemisch reduktiv hergestellten Substrat einerseits zum Zweck sinnvoller Kombination (Kaskadierung) eine Spezifikation und andererseits gezielte Weiterentwicklung vorgenommen werden.

1.2.10. Leistungsauskopplung

Zur Auskopplung eines Nutzleistungsanteils ist keine der unter Abschnitt 1.2.7. dargestellten Kontaktierungen/Verbindungen geeignet. Das liegt daran, dass eine solche Verbindung bzw. der gesamte Auskoppelmechanismus insbesondere energetisch verlustarm sein muss und die Verformung nicht mit der Eigenmasse verhindern darf. Unter den Bedingungen, dass ein Gestell die Halterung und elektrische Versorgung des IPMCs übernimmt, besteht die Möglichkeit über eine hauchdünne, elastische Membran, die ebenfalls mit dem Gestell verbunden ist, eine vom IPMC generierte Verformung entweder in eine vom Zentrum der Membran senkrecht ausgehende Translation oder in eine Verdrängung von Volumen umzuwandeln. Bei letzterer Variante kann jeder Verformungsanteil, der in die entsprechende Richtung abzielt abgegriffen und genutzt werden.

1.2.10.1. Herstellung einer speziellen Membran aus Silikon zur Auskopplung der Leistung

In Zusammenarbeit mit der TU Budapest wurde es möglich, hochflexible aber haltbare Polysiloxan-Membranen zum Zweck der Leistungsauskopplung und der Trennung der IPMCs von der Umgebung bzw. im Hinblick auf die Konstruktion einer Pumpe, der Trennung vom Pumpgut, herzustellen. Dazu wurde ein Formwerkzeug gefertigt, mit Hilfe dessen verschiedene Membrandicken realisiert werden können. Um dem sich bewegenden IPMC einen möglichst geringen mechanischen Widerstand entgegen zu setzen, trotzdem aber durch Elastizitäten einen Rückstelleffekt hervor zu rufen, wurde die notwendige Dicke iterativ ermittelt, vgl. Tab. 4. Als Basismaterial kam sowohl 1-Komponenten- als auch 2-Komponenten-Silikon lt. Tab. 3 zum Einsatz. Diese Membranen sollten die vorgereckten Polyethylen-Membranen ersetzen. Abb. 25 zeigt die zum Herstellungsprozess notwendige Ausstattung sowie die gefertigten Membranen. In Bezug auf die mechanischen Eigenschaften sind diese Silikonmembranen zwar ideal (Anwendung im radialsymmetrischen Aktor, der im Abschnitt 11.2 dargestellt ist), geht es jedoch um den Einsatz in einer Fluidpumpe, stellt die Wasserdurchlässigkeit ein Problem im Zusammenhang mit längeren Betriebs- bzw. Standzeiten mit Befüllung durch Pumpgut dar. Nach der Skalierung des radialsymmetrischen Zuschnitts, vgl.

Abschnitt 5, kamen aus diesem Grund gestanzte Vinylmembranen zum Einsatz, die im Gegensatz zum Silikon wasserundurchlässig sind.

Tab. 3: Verwendete Basismaterialien

Hersteller	Bezeich-nung	Optische Eigen-schaften	Mischungs-verhältnis	Konsistenz im Rohzustand	Härte nach Verarbeitung (shore-Grade)	Vulkanisations-temperatur und -zeit
NuSil	LSR-5820	matt	A:B=1:1	flüssig	SH20	150°C, 5 min
Dow Corning	EHX-25 MGP00	matt	1-komponentig	fest	SH25	170°C, 15 min 200°C, 4 h

Tab. 4: Gefertigte Membrantypen

Material	Dicke (ca.) in mm der gefertigten Membranen	Bezeichnung s. Abb. 7	Bemerkung
EHX-25 MGP00	0,35	n.bez.	Barriere aus Karton, ohne Formwerkzeug
EHX-25 MGP00	0,8	A	Dicke = Resultat aus Einfüllmenge u. Druck i. Formwerkzeug
EHX-25 MGP00	0,18	B	2 Stück Papier als Distanzhalter in Formwerkzeug
EHX-25 MGP00	0,11	C	1 Stück Papier als Distanzhalter in Formwerkzeug
LSR-5820	0,16	D	2 Stück Papier als Distanzhalter in Formwerkzeug
LSR-5820	0,08	E	1 Stück Papier als Distanzhalter in Formwerkzeug

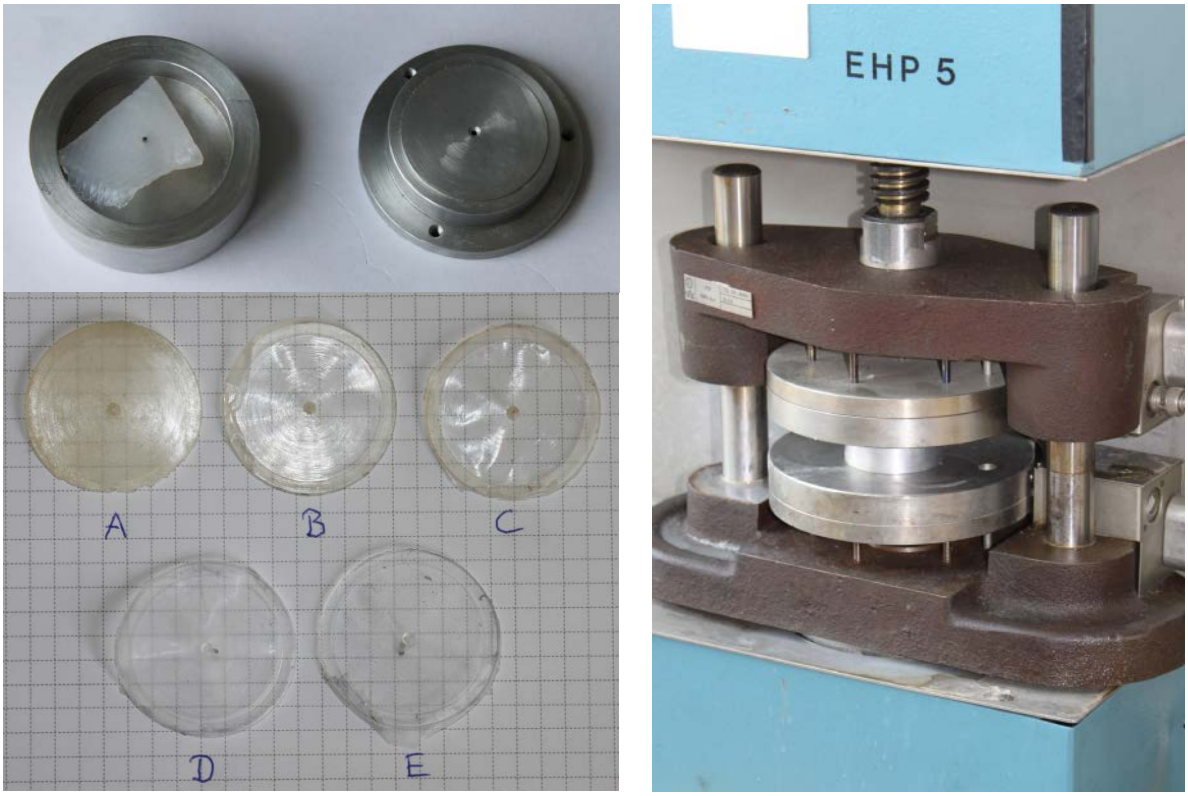


Abb. 25: links oben: Formwerkzeug; rechts: Press-und Vorvulkanisiereinrichtung; links unten: gefertigte Membranen lt. Tab. 3

1.2.11. Aktoren

Parallel zur Weiterentwicklung der IPMCs wurden mehrere Aktoren aufgebaut. Im Wesentlichen basieren diese auf Rechteck- bzw. optimierten Rechteck-IPMCs und auf radialsymmetrische Zuschnitte.

1.2.11.1. Rechteckbasierende Aktoren

Rechteckförmige IPMCs wurden auf verschiedene Weise zu Aktoren verarbeitet. In Abb. 26 sind der Aktor nach dem Muskelvorbild (Sarkomerprinzip) und das Bogenzweieck dargestellt. Einen Nutzleistungsanteil auszukoppeln gelang nur mit dem Aktor nach dem Sarkomerprinzip.

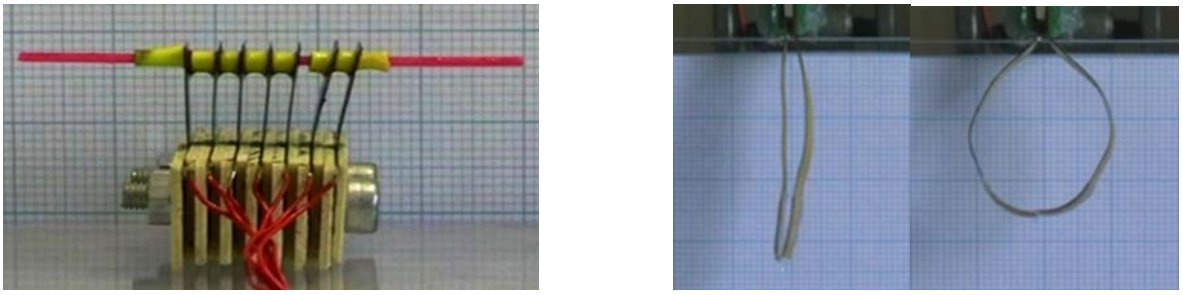


Abb. 26: links: Aktor nach Sarkomerprinzip; rechts: Bogenzweieck und seine Verformung

Der Nutzleistungsanteil bei dem in Abb. 26* dargestellten Aktor (hinten rechts im Bild) beläuft sich auf das Heben und Senken einer LED zur gesteuerten Führung sichtbaren Lichtes. Bestimmte stationäre Zustände wurden hierbei mit gezielten Polungswechseln um die Position herum erreicht, so dass es möglich war, bestimmte Areale einer Ebene auszuleuchten.

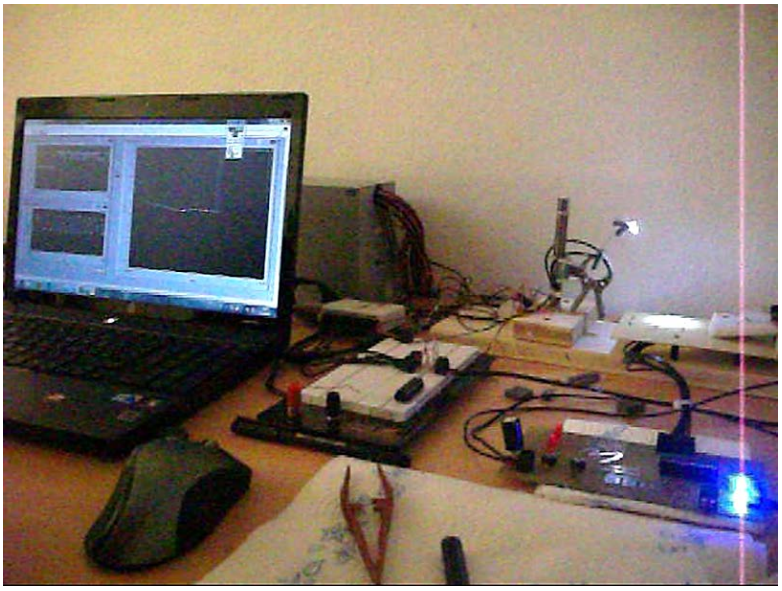


Abb. 26*: Aufbau zur gesteuerten Führung sichtbaren Lichtes

1.2.11.2. Aktoren auf Basis der radialsymmetrischen Zuschnitte

Der Versuch der Systemintegration des Malteserkreuzes beim Aktor „Malteserkreuzkammer“, vgl. Abb. 27, scheiterte an mechanischen Zwängen bzw. an der bis dahin noch nicht vollzogenen Optimierung. Ein großes Problem hierbei war außerdem die Elektrolysegasentwicklung, die den Raum, in dem das IPMC eingebunden war, aufblähte. Hierbei wurde festgestellt, dass das verwendete Polymer Nafion™ chemisch instabil ist, d.h. dass sich die Sulfonsäuregruppe während des Betriebs löst und zu einer weiteren Verschleißerscheinung (Zerfall) führt, die sich durch säuerlichen Geruch bemerkbar macht.

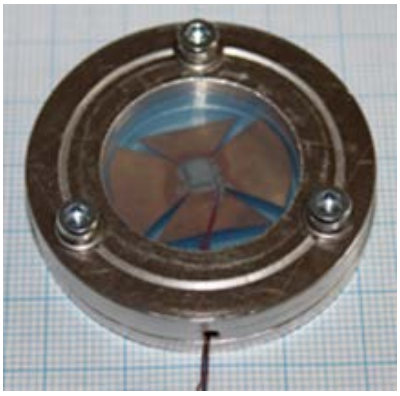


Abb. 27: Malteserkreuzkammer

Das Problem des Aufblähens wurde durch die Unterteilung in Quell- und Betriebsphase bzw. durch Vergrößerung der Entlastungsöffnungen beim translatorischen Aktor, vgl. Abb. 28, gelöst. Vor der Betriebsphase wurde das Quellungsmittel abgelassen. Durch Einsatz optimierter Zuschnitte in Kaskadierung und der Verwendung dünner Auskoppelmembranen konnte erstmals der Verlustleistungsanteil so gering gehalten werden, dass ein Nutzleistungsanteil ausgekoppelt werden konnte.

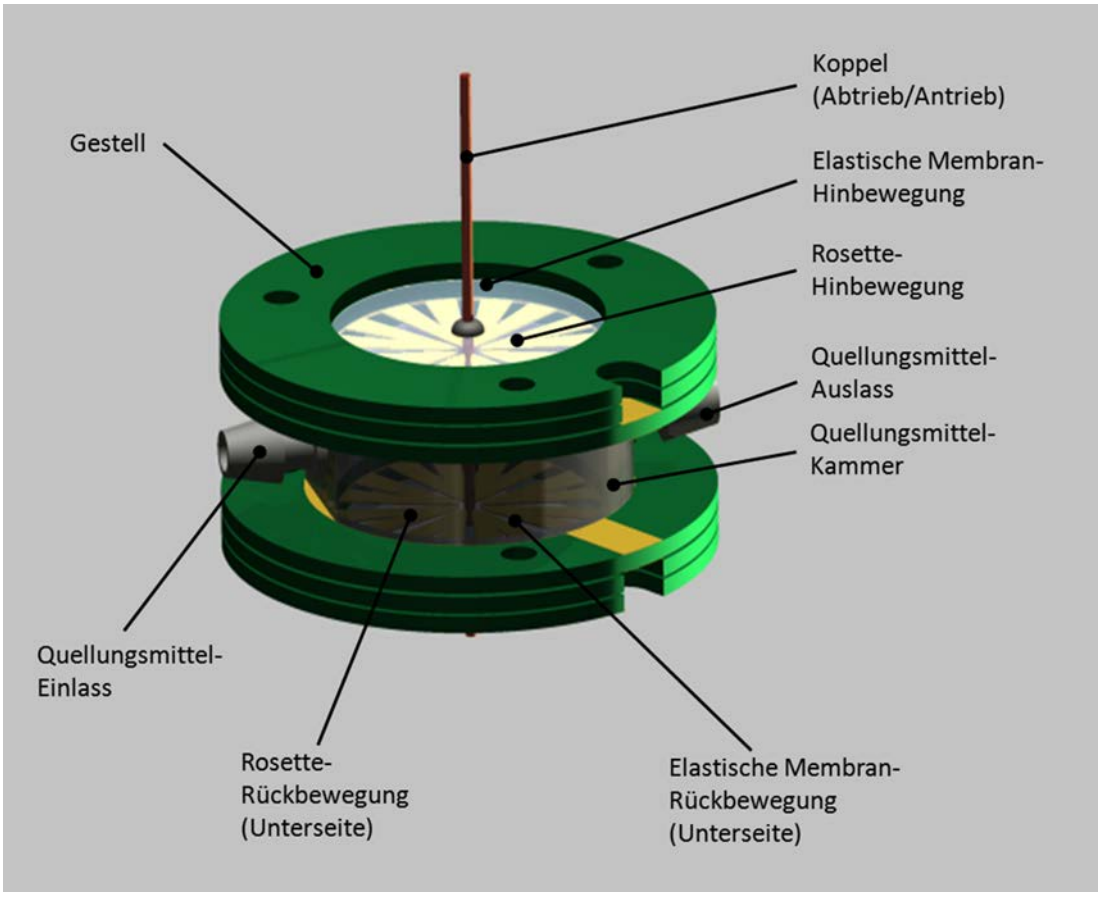


Abb. 28: Translatorischer Aktor auf Basis 2er radialsymmetrischer Zuschnitte

1.2.12. Fluidpumpe

Der in Abb. 30 dargestellte Entwurf einer 6-zelligen Fluidpumpe wurde auf Basis des einzelligen Pumpenprototypen nach Abb. 29 real aufgebaut und getestet. Beim Prototypen wurde zur Verringerung des Reibungswiderstandes zwischen IPMC und Auskoppelmembran Silikonöl verwendet. Die Funktionsweise ist eingehend in der Gebrauchsmusterschrift „Membranpumpe und deren Verwendung“ (20 2013 000 769.9) beschrieben. In verschiedenen Testdurchläufen wurden damit Durchflussraten von ca. 1-3 µl/Hub erreicht.

Abb. 29: links: Skalierter radialsymmetrischer Zuschnitt in der elektromechanischen Kontaktierung; rechts: Einzelliger Pumpenprototyp auf Basis des skalierten radialsymmetrischen Zuschnitts

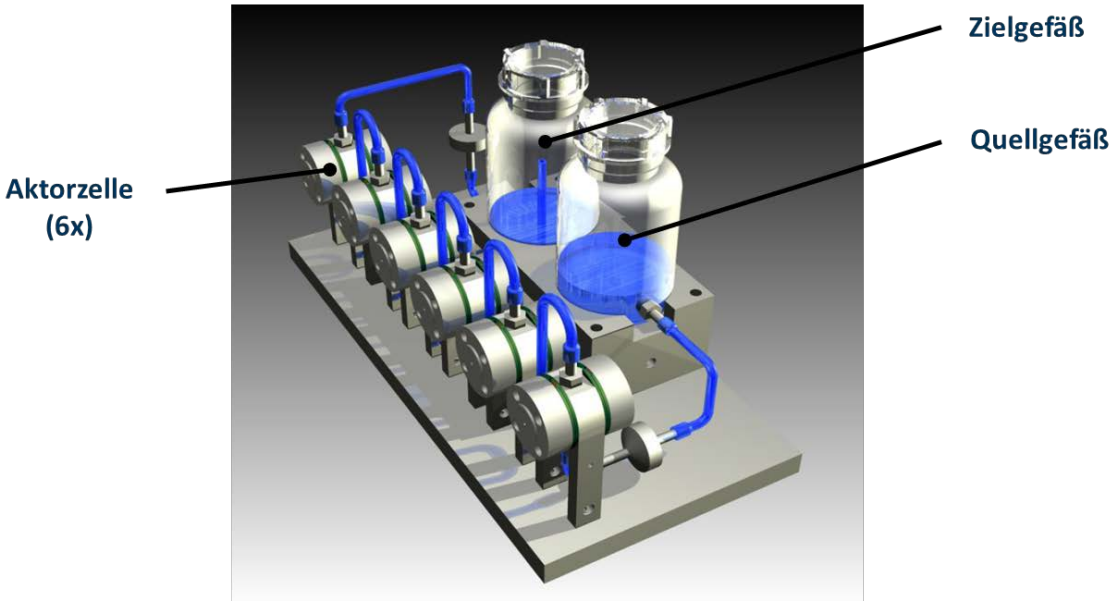


Abb. 30: Entwurf der IPMC-aktuierten Membranpumpe

Quellenverzeichnis zu Punkt 1.2.

[1] Technische Universität Ilmenau, Fakultät Maschinenbau, Fachgebiet Maschinenelemente (2001): Lehr- und Arbeitsblätter Maschinenelemente.

[2] Hochmuth, Andreas (2011): Protokoll „Rauhigkeitsmessungen an sandgestrahlten Nafion-Proben“, Technische Universität Ilmenau, Fakultät Maschinenbau, Fachgebiet Anorganisch-nichtmetallische Werkstoffe.

[3] Conrad, Daniel (2011): Protokoll über Laserschneidversuche von Nafionbasierten IPMC´s. Günter-Köhler-Institut für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH Jena (IFW)

2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises - Begründung des Einsatzes

Polymer-Tester u. Multifunktionskarte als Modular Force-Tester: Das von der Fa. TETRA zu einem Polymer-Kraft-Messgerät adaptierte System BASALT (ursprünglich ein Tribometer) als Basiseinheit mit einer Messauflösung bis zu einem µN bei einem Messbereich bis zu F_{max} = 1 N wurde zur hochpräzisen Erfassung der Kräfte bzw. Biegemomente neben den passiven mechanischen Parametern von sehr kleinen Polymer-Aktorelementen eingesetzt. Die Probenaufnehmer unter dem Messkopf bedurften einer Spezifikation, damit sowohl die Geometrie als auch der nichtlineare Bewegungsverlauf der sich verformenden Aktoren (z.B. als nachgeführte Antastung, einstellbare Gegenkräfte) möglich wurde. Andere kommerzielle Kraftmesseinrichtungen erfüllten entweder nicht diese Messanforderungen oder ließen sich nicht auf die spezielle Probenform der Polymere anpassen. Diese Anlage stand auch für Messungen des Projektpartners zur Verfügung, indem die vom TITK zu vermessenden Proben nach deren Quantifizierung der speziellen Werkstoffparameter ebenfalls im Labor des Teilantragstellers eingebracht wurden.

Zwei baugleiche Kameras Panasonic waren erforderlich, um den räumlichen Bewegungsverlauf bei der sphärischen Verformung des Substrats aus zwei Blickwinkeln für die Maxtrac-Bahnverfolgung zu registrieren.

Ein Stereo-Auflicht-Mikroskop der unteren Leistungsklasse ist hinreichend für die Montage von feinstrukturierten Polymer-Aktor-Elementen zu Systemen und sollte zur visuellen Kontrolle und der Dokumentation der Funktionalität der Bewegungsstrukturen eingesetzt werden.

Die Präzisionswaage diente in Verbindung mit der Dickenmessung mittels Mikrometerschraube zur Erfassung des Quellungszustandes des Aktor-Polymers. Da sich diese Massendifferenzen an Proben-Körpern auch im unteren Milligramm-Bereich auswirken werden, war diese Präzision erforderlich.

Ein Messrechner mit einer Datenerfassungssoftware, die voraufbereitete, analoge/digitale Werte speichert und ausgibt, der für die simultane Aufnahme der zum Teil synchron zu erfassenden Größen (Kräfte, Massen, Stellwege, Volumina) bereit stand, komplettierte das mechanische Kraft-Weg-Messsystem.

Der im Antrag erwähnte Laser-Wegaufnehmer zur berührungsfreien Verformungs-Messung, der parallel zum Kraftmess-System die Stellwege aufnehmen konnte, um in Echtzeit Aussagen zur Kraft-Weg-Kennlinie ableiten zu können, wurde dabei aus eigenen Mitteln erstellt.

Das Druckmessgerät diente zur Erfolgskontrolle der als Demonstrator aufzubauenden Folienaktor-Pumpe und sollte hochaufgelöst die unter der Funktion generierten Fluid-Druckänderungen dokumentieren, um eine Förderleistungs-Charakteristik aufzunehmen.

Ein pH-Wertmessgerät machte sich erforderlich, um Wechselwirkungen bei der Funktion des Aktormaterials mit den zu fördernden Fluiden zu überprüfen. Bei längerem Betrieb der Folienaktoren wurde eine Veränderung des pH-Wertes wahrgenommen.

2 Labornetzgeräte zur Spannungsversorgung der unterschiedlichsten Aufbauten

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Mit diesem Vorhaben betraten die Projektpartner technologisches Neuland, obwohl viele der Einzelschritte von anderen Autoren schon beschrieben wurden (chem. Metallisierungsverfahren, Ionic Liquids als Solvent, Folienverbunde für Pumpanwendungen u.a.). Für praktische Anwendungen und Realisierungen war allerdings eine Vielzahl von Grundlagenuntersuchungen erforderlich. Das Neuartige der vorliegenden Arbeit ist das Zusammenführen der Einzelergebnisse zu einer technologischen Abfolge von der Abformung des Aktorsubstrats bis zur Fertigung eines mechatronischen Systems mit der Fähigkeit zur kontinuierlichen Verrichtung von Arbeit. Der Stand der internationalen Fachliteratur belegt, dass parallel dazu in Forschungseinrichtungen sowohl in Deutschland (Inst. F. Mikro- u. Informationstechnik d. Hahn-Schickard-Ges.), insbesondere aber den USA (MIT, SRI International.; Biomedical Eng. Lab. - Univ. of Maine; Univ. of Maryland; Medipacs LLC Tucson), Canada (Univ. of Toronto),); Italien (Res. Centre „E. Piaggio“ Pisa), South Korea (Sungkyunkwan Univ.- Polym. Syst. Eng.) und Japan (Nat. Inst. Adv. Industr. Sci. Technol.) namhafte Forschergruppen an diesem Thema seit mehreren Jahren arbeiten. Der Applikation dieser „smart material“-Klasse, die durch ihre relativ freie Formgebung für viele Integrationen geeignet scheint, wird also international eine große Bedeutung beigemessen. Somit muss eine eigene Vorlaufforschung für den nationalen Markt auf diesem Gebiet mit dieser Entwicklung Schritt halten.

4. Voraussichtlicher Nutzen u. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Es war beabsichtigt, patentreife Lösungen des Projektes schützen zu lassen und damit einen gewissen Entwicklungsvorsprung zu sichern. Das betrifft die Kombination aus Wirkprinzip, Aufbau, Werkstoffwahl und Ansteuerung zur entsprechenden Anwendungmöglichkeit der Fluidpumpe. Es ist angedacht diese nach weiteren Entwicklungsschritten, insbesondere deutlicher Reduzierung der äußeren Abmaße, in Mikrosystemen z.B. als Pump- oder Dosiereinrichtung zu platzieren mit dem Vorteil, der dann entfallenden, jedoch bisher üblichen, Versorgungs- und Ansteuerperipherie. Der Fluidstrom ist dabei, bedingt durch die Besonderheiten des Materials geprägt von einer sehr „weichen“ Charakteristik, d.h. nicht impulsartig in Relation zum Arbeitstakt. Innerhalb von Lab-on-a-chip-Anwendungen, z.B. in der kombinatorischen Chemie und dem Zell-Handling, könnte das Pumpmodul als vervielfachbarer Normbaustein Einzug halten. Voraussetzung, nachdem grundlegend die Funktion nachgewiesen ist, ist dazu noch die Integration des Aktor-Substrats in die Technologie-Schritte des Zentrums f. Mikro- u. Nanotechnik. Aufbauend auf die bei den Partnern vorhandenen Patente (s. Pkt. 2.2 der Projektskizze), stellt die Applikation der IPMCs in Pumpen eine Weiterentwicklung mit dem Ziel größerer Einsatzbreite dar. Die Gemeinschaftsleistungen der Projektpartner wurden gemeinsam zum Schutz angemeldet. Die Applikation in der körpernahen Mechano- und Chemosensorik in vivo hat bereits mit den Tests als aktiver Verblockungsschutz für pH-Sonden mit dem FZMB Bad Langensalza begonnen. Dabei sollen jedoch zuerst nicht mechanische,

sondern chemische Eigenschaften, wie die Kationenleitfähigkeit als auch eine geringe Protein- und Zelluläre Adhärenz zum Einsatz kommen. Es ist nicht auszuschließen, dass die im Projekt erprobte mechanische Aktivität zur Dynamisierung des Covering führen kann.

Nicht zu bemessen ist der Nutzen, dieses Material und die daran untersuchten Funktionen in der universitären Lehre einzusetzen, indem Studenten die Möglichkeit bekommen, an einer komplexen Aufgabenstellung „Biomedizinische Applikation der aktiven Eigenschaften der IPMC“ mitzuwirken.

5. Während der Durchführung bekannt gewordene Fortschritte

M. Shahinpoor (Univ. of Maine) beschreibt in “Biomedical Applications of Electroactive Polymers” (Ed. F. Carpi et E. Smela, 2009, J. Wiley Publ.) einen “IPMC-muscle” namens “eight-finger”, der eine ähnliche funktionelle Geometrie wie die vom Projektbearbeiter an der TU Ilmenau entwickelte „Malteserkreuz“-Struktur aufweist und den Effekt der sphärischen Verformung ausnutzt. Anwendungen dessen als Greifer bzw. als „heart compression device“ werden dazu vorgeschlagen. Leistungsparameter dieses Effektors werden nicht angegeben (pp. 137 – 159)

Mit “IPMC Assisted Infusion Micropumps“ berichten Park, I-S. et al. (in F. Carpi et E. Smela, 2009, J. Wiley Publ.: pp. 175 – 191) vom Aufbau einer planaren Pumpe mit linearem Kanal, deren Hubraum durch 2 gegenständige Serien von „interdigitated“ Biegestreifen metachron verengt wird. Dieses Prinzip kommt wiederum dem Konzept der Peristaltik entgegen. Angestrebt ist die Anwendung als Injektionspumpe, die somit den Venendruck des Körpers überwinden soll. Angenommen wird eine Förderrate von 12 ml pro min bei 0,07 bar. Die Bemaßung des Demonstrators liegt jedoch ebenfalls noch in der Größenordnung der Feinwerktechnik, also im mm-Bereich. Methodisch interessant sind die Darstellungen von flächigen Aktormembranen mit kreisrundem oder quadratischem Zuschnitt, deren FEM-Modellierung nicht auf die bei größeren Stellwegen auftretenden inneren Verspannungen des Materials hinweisen.

6. Veröffentlichung des Ergebnisses

Im ersten Jahr der Projektlaufzeit (2010) wurden zur Konferenz für Bionik an der HS Bremen auf einem Poster mit dem Titel „IPMCs – auf dem langen Weg zum künstlichen Muskel“ (Schilling, C., Schrödner, M., Kempf, W. Olivera, M., Witte, H, Köhring, S., Fremerey, M.) das Konzept vorgestellt. Der Abstract erschien in: Bionik - Patente aus der Natur (Hrsg. A. Kesel; pp. 342 – 246).

Mit einem Poster zusammen mit dem ÖkoLab GmbH wurden auf der Konferenz der Chemischen Ges. Bratislava 5/2011: “Ionic Polymer-Metal-Composites – a Chemical Way for Generation of Mechanical Work”; (Müller, R., Betz, I. - Ges. f. Umweltchemie Erfurt ; Schrödner, M. (TITK), Kempf, W., Schilling, C.) der chemischen Fachwelt die Fragen der Metallisierung und des Einsatzes der Solventien vorgestellt.

Mit Vortrag und Abstract "Results of Modeling the Mechanical Behavior of an Ionic Polymer-Metal-Composite for Assembling as Actuation Systems” (Schilling, C., Kempf, W., Schrödner, M., Köhring, S., Witte, H.) zum “56th Int. Sc. Conf. -IWK Ilmenau University of Technology” 9/2011 wurden über die Zuarbeit des Zentrum f. Mikro- u. Nanotechnik und die Ergebnisse der Zusammenarbeit mit der TU Budapest (H) berichtet.

Gebrauchsmusteranmeldung: „Membranpumpe und deren Verwendung“ (20 2013 000 769.9)

Es ist eine ISBN-registrierte Publikation in der Schriftenreihe „Berichte zur Biomechatronik“ im Universitätsverlag Ilmenau in Arbeit, in der die beiden Projektpartner in Koautorenschaft die wesentlichen Ergebnisse dieses Projekts für potentielle Anwender anschaulich darstellen werden.

Ilmenau, den 22. 06. 2012

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte

(Teilprojektleiter)