

Initiative zur Einrichtung eines Schwerpunktprogramms

KOMMMA

Kooperative mehrstufige multistabile Mikroaktorsysteme

Programmausschuss

Koordinator:

Prof. Dr. Manfred Kohl, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mikrostrukturtechnik
Smart Materials and Devices; Mikro-/Nanosysteme aus Smart Materials
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1 (Geb. 301), 76344 Eggenstein-Leopoldshafen
Tel: 0721 608-22798, e-mail: manfred.kohl@kit.edu;

Weitere Mitglieder:

Prof. Dr. Ulrike Wallrabe, IMTEK, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Mikroaktorik, Prozesse, Materialien

Prof. Dr. Matthias Nienhaus, Universität des Saarlandes
Antriebstechnik, Ansteuer- und Regelungstechnik

Prof. Dr.-Ing. Eckhard Quandt, CAU Kiel, Institute of Materials Science
Anorganische Funktionsmaterialien, Dünnschicht-Aktoren und -Sensoren

1 Zusammenfassung

Anhaltende Miniaturisierung und Zunahme an Funktionsanforderungen für mikrotechnische Systeme erzeugen einen wachsenden Bedarf an innovativen Ansätzen zur Kontrolle von z. B. mechanischen, optischen oder strömungstechnischen Vorgängen auf kleinem Bauraum. Eine wichtige Voraussetzung dazu ist die intelligente Kopplung verteilter Mikroaktoren zu einem kooperativen, synergetisch arbeitenden System. Dies eröffnet das Potenzial, neue Funktionalitäten zu erzeugen und damit auch komplexe Aufgaben mit bislang nicht möglichen Kraft-Stellweg-Dynamik-Kombinationen zu erfüllen. Mittlerweile sind zwar viele verschiedene Mikroaktoren entwickelt und verfügbar, aber ihre systematische Kopplung zu kooperativen mehrstufigen oder etwa multistabilen Mikroaktorsystemen steht bislang aus.

Aktuelle Entwicklungen der Mikrosystemtechnik konzentrieren sich in besonderem Maße auf Sensoren und Sensorsysteme, nicht zuletzt um dem aktuellen Bedarf (Internet der Dinge, Industrie 4.0) gerecht zu werden. Die aktuell starke Entwicklung von Sensoren in vielen Industrien wird dazu führen, dass der Bedarf an Aktorik auf kleinem Bauraum deutlich zunimmt, so dass die aktuelle „Sensor-Phase“ [Cam2017] als Wegbereiter einer zu erwartenden „Aktorik-Phase“ angesehen wird [Yole2015]. Dies wird durch die zunehmende Anzahl an Forschungsaufträgen für Mikroaktorsysteme belegt, z.B. die aktuelle Ausschreibung des „Tactile Display Horizon“-Preises (3 Mio €) der Europäischen Kommission [EC2017]. Bislang existieren nur wenige, aber gleichwohl prominente Beispielanwendungen wie Mikrospiegelarrays oder Tintenstrahldrucker, die das Potenzial kooperativer Mikroaktorsysteme eindrucksvoll unterstreichen.

Ziel dieses interdisziplinären Schwerpunktprogramms (SPPs) ist es, neue theoretisch begründete Konzepte für das Verständnis der komplexen Kopplungs- und Synergieeffekte bei der Kombination von Mikroaktoren zu schaffen, sowie neue Entwicklungs-

methoden für eine neue Generation von Mikroaktorsystemen zu erarbeiten, die aus einem mehrstufigen, kooperativen und/oder multistabilen Aufbau aus gleich- oder verschiedenartigen Aktoren bestehen.

Aufgrund der nichtlinearen multiphysikalischen Kopplungseffekte, Querempfindlichkeiten sowie stark unterschiedlichen Längenskalen ist die Entwicklung kooperativer mehrstufiger und multistabiler Mikroaktorsysteme eine große Herausforderung. Neue methodische Ansätze zur Beschreibung von Wirkungsketten über mehrere Längenskalen in mehrstufigen Aktorsystemen vom Nanometer- bis in den Zentimeterbereich müssen entwickelt werden. Neue ordnungsreduzierende Simulationsverfahren sind zu entwickeln um eine Modellierung sämtlicher multiphysikalischer Kopplungseffekte eines Mikroaktorsystems zu ermöglichen. Die Komplexität der Mikroaktorsysteme erfordert neue Methoden zu Entwurf, Herstellung und Betrieb.

Die Umsetzung dieses Entwicklungsschritts erfordert daher ein interdisziplinäres SPP, das Arbeitsgruppen aus verschiedenen Fachgebieten der Mikroaktorik, Mikrosystemtechnik, Materialwissenschaften, Systemsimulation, Antriebs-, Regelungs- und Systemtechnik zusammenführt und deren komplementäre Expertise von den Grundlagen bis zur Systementwicklung bündelt.

Das SPP konzentriert sich auf die Kernthemen Kopplungseffekte, Synergieeffekte, Systemarchitekturen und Entwicklungsmethoden für mikrosystemtechnische Anwendungen. Aufbauend auf einem grundlegenden Verständnis von Kopplungseffekten und Synergien aufgrund der räumlich begrenzten Anordnung unterschiedlichster Mikroaktoren, funktioneller Untereinheiten und Funktionsmaterialien, sollen neue Systemarchitekturen und Entwicklungsmethoden für Mikrosysteme, wie z.B. mikromechanische, -optische und -fluidische Systeme, erschlossen werden.

2 Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten

2.1 Die Rolle der Mikroaktorik in der Mikrosystemtechnik

Die Mikroaktorik hat ihre Ursprünge in der Silizium-Mikromechanik [Pet1982]. Die hohe Präzision in der Strukturierung von Silizium und dessen hervorragende mechanische Eigenschaften erlauben die Herstellung robuster frei beweglicher Si-Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis, wie z.B. Si-Membranen oder Si-Kammstrukturen. Bei geeigneter Dotierung sind diese elektrisch ansteuerbar [How1990] und aufgrund ihrer Kompatibilität mit anderen Si-basierten monolithischen Prozessen sehr gut in mikroelektronische Komponenten integrierbar. Derartige elektrostatische Mikroaktoren besitzen jedoch einige prinzipielle Nachteile, da sie relativ hohe elektrische Feldstärken, bzw. elektrische Spannungen benötigen, um ausreichende Kräfte zu erzeugen, und gegenüber Umwelteinflüssen (Feuchte, Partikel) sehr empfindlich sind.

Da Silizium selbst kein Wandler-(Transducer-) Material ist, das elektrische, thermische, magnetische oder optische Energie direkt in mechanische Arbeit wandeln kann, müssen zusätzliche Materialien in siliziumbasierte Mikrosysteme eingeführt werden. Eine einfache Möglichkeit bietet die Deposition metallischer Schichten, um z.B. Leiterbahnen oder Heizleiter zu erzeugen. Dieser Ansatz führt zu thermischen Mikroaktoren, die auf der thermischen Ausdehnung bei lokaler Erwärmung durch Widerstandsheizung beruhen und ebenfalls kompatibel mit Si-basierten Prozessen sind [Wu2008]. Es können relativ hohe Kräfte erzielt werden, jedoch sind der relativ hohe Leistungsbedarf, thermisches Übersprechen und geringe Dynamik von Nachteil.

Neben den Herausforderungen der technischen Herstellbarkeit treten bei abnehmender Baugröße zunehmend fundamentale physikalische Grenzen der Leistungsfähigkeit der Aktoren auf. Klassische Elektromotoren zeigen beispielsweise ein schlechtes Skalierungsverhalten ihrer Arbeitsdichte, wodurch bei Miniaturisierung in den Submillimeterbereich die erzielbaren Kräfte und Stellwege technisch uninteressant werden [P1]. Diese Zusammenhänge haben für die

Mikroaktorik zur Konsequenz, dass bewährte makroskopische Prinzipien aufgegeben und neue Aktorkonzepte entwickelt werden müssen. In diesem Zusammenhang rücken Aktoren aus festkörperbasierten Wandlermaterialien in den Fokus des Interesses, da sie das Potenzial zu erweiterter Funktionalität (strukturelle Funktionen, Sensorik) und hoher Arbeitsdichte besitzen. Dazu zählen insbesondere piezoelektrische, ferromagnetische oder ferroelastische Schichten, die z.B. durch physikalische Deposition (PVD) abgeschieden und nachfolgend durch laterales Strukturieren (chemisches Ätzen, Lift-Off) in die gewünschte Gestalt überführt werden können. Alternativ werden festkörperbasierte Mikroaktoren oft getrennt prozessiert und optimiert, bevor sie durch Hybridintegration in das Mikrosystem eingeführt werden. Dabei kann die Baugröße erheblich variieren, wodurch derartige Aktoren ein weites Spektrum zwischen Mikroaktorik und feinmechanischer Miniatur-Aktorik abdecken.

Bild 1 gibt einen Überblick zu charakteristischen Spannungen und Dehnungen, aus denen erzielbare Kräfte und Stellwege von Einzelaktoren resultieren [Lai2013]. Piezoelektrische Aktoren zeichnen sich beispielweise durch hohe mechanische Spannungen bis zu 10 MPa aus, während erzielbare relative Dehnungen unter 10^{-3} liegen. Durch mechanische Übersetzungen

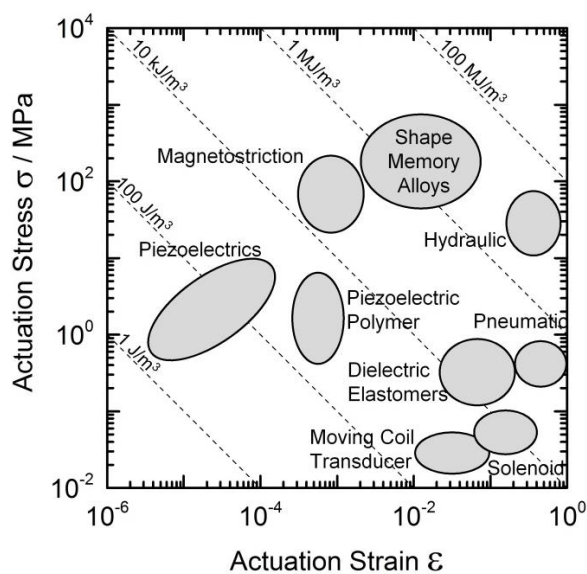


Bild 1: Erzielbare mechanische Spannungen σ und Dehnungen ϵ für verschiedene Aktorprinzipien. Gestrichelte Linien entsprechen gleichen Arbeitsdichten, die durch $\sigma \cdot \epsilon$ gegeben sind (angepasst von A. Lai et al., Science 341 (2013) 1505-1508) [Lai2013].

wie im Zusammenwirken aktiver und passiver Schichten können wesentlich größere Stellwege erreicht werden (z.B. [Aba2010, Bol2010]), allerdings auf Kosten der Aktorkräfte. Ferromagnetische Mikroaktoren basieren meist auf dem Reluktanzprinzip [P6, Scho2008, Büt2014]. Darauf basierende mikrotechnische Linearantriebe erreichen relativ große Stellwege bei vergleichsweise geringen Kraftdichten. Dielektrische Elastomeraktoren (DEA) werden als Vielschichtstapel mit über 100 bis zu 5 μm dünnen Schichten hergestellt, um mechanischen Deformationen bis zu 20% zu erreichen [Schl2005]. Mikroaktoren aus Formgedächtnislegierungen (FGL) zeigen vergleichsweise große Änderungen von mechanischer Spannung und Dehnung, wodurch sehr hohe Arbeitsdichten in der Größenordnung bis zu 10^7 J/m^3 resultieren [P1]. Im Vergleich dazu erreichen Mikroaktoren aus Formgedächtnispolymeren (FGP) Arbeitsdichten von 10^6 J/m^3 bei einer Dehnung von 100% [Ohm2010, Scha2015, Scha2017].

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass für jedes Aktorprinzip in Abhängigkeit von Material und Design unterschiedliche Kraft-Stellweg-Dynamik-Kombinationen erzielbar sind, die die Grenzen der Anwendbarkeit von Einzelaktoren aufzeigen. Dies betrifft sowohl die Längenskala, innerhalb der eine Wirkung erzielt werden kann, als auch die verfügbaren Kräfte und Schaltgeschwindigkeiten. Die gezielte synergetische Kopplung verschiedener Mikroaktoren, aufbauend auf mehrstufigen Systemarchitekturen ist erforderlich, um die bestehenden Grenzen durch Nutzung kollektiver Mechanismen und Synergien zu überwinden.

Hinzu kommt, dass es für die erforderliche freie Beweglichkeit von Mikroaktoren keine Lager im klassischen Sinne gibt. So existieren technologiebedingt weder Kugellager noch geschmierte Gleitlager. Darum werden Mikroaktoren häufig mit Festkörpergelenken ausgelegt, insbesondere bei geringer Baugröße oder hohen Anforderungen an die Stellgenauigkeit [Mar2017]. Derartige

Federaufhängungen bewirken jedoch, dass es keinen kräftefreien Zustand in einer ausgeLenkten Position gibt. Daraus folgt ein kontinuierlicher Energieverbrauch, um eine Position stabil zu halten. Energieeffizientere Lösungen bieten bi- oder multistabile Systeme, die durch ein kooperatives mehrstufiges Zusammenwirken einzelner Aktorelemente einerseits Energie sparen und andererseits neue Freiheitsgrade ermöglichen, sowie berührungslose Lager durch magnetische Levitation [Pol2017].

Dieser Entwicklungsschritt erfordert einerseits ein grundlegendes Verständnis von Kopplungseffekten und Synergien, die bei räumlich begrenzter Anordnung unterschiedlichster Mikroaktoren, funktioneller Untereinheiten und Funktionsmaterialien entstehen, andererseits werden völlig neue Konzepte zum Entwurf gekoppelter Aktorsysteme, zu deren Herstellung und zum geregelten Betrieb benötigt. Die nichtlinearen multiphysikalischen Kopplungseffekte und stark unterschiedlichen Längenskalen stellen klassische numerische Entwurfsverfahren vor große Herausforderungen. Beispielsweise wäre die Kombination eines elektromagnetischen Aktors (bestehend aus Spulen, magnetischen Kreisen, Federelementen, etc.) mit einem piezoelektrischen Aktor (piezoelektrische Dünnschichten, Dünnschichtelektroden) im Rahmen einer klassischen Finite-Elemente Simulation aufgrund der stark unterschiedlichen Aspektverhältnisse nicht machbar. Um Mikroaktoren geregelt zu betreiben, werden die notwendigen Regler meist in einem separaten Schritt entworfen, auf Basis der bereits abgeschlossenen Spezifikation des Mikroaktors. Das führt zu einem insgesamt suboptimalen Gesamtsystem, in dem der Regler die geforderte Dynamik bzw. Präzision zwar gewährleistet, aber z.B. hohe Stellgrößen entstehen. Diese Beispiele verdeutlichen den dringenden Bedarf, adäquate Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, die der Komplexität des Gesamtsystems gerecht werden, etwa ordnungsreduzierende Verfahren für multiphysikalische Mikrostrukturen [Kud2015, Bech2013] oder Methoden für das Co-Design von Mikroaktoren und Regler.

Die Erforschung und Entwicklung kooperativer mehrstufiger und multistabiler Mikroaktorsysteme (KOMMMA) ist eine interdisziplinäre Herausforderung. Das beantragte SPP versteht sich als wissenschaftlicher Wegbereiter für diesen wichtigen Entwicklungsschritt.

2.2 Stand der Forschung zu kooperativen und mehrstufigen Mikroaktorsystemen

Das Potenzial von kooperativen Mikroaktorsystemen wird an wenigen prominenten und kommerziell sehr erfolgreichen Beispielanwendungen unterstrichen. Dazu zählen insbesondere Mikrospiegelfelder und Tintenstrahldrucker bestehend aus vielen gleichartigen Aktoren, die individuell angesteuert werden und dabei parallel arbeiten, um kooperativ eine Systemfunktion, hier ein Bild, zu schaffen. Weitere Mikroaktorsysteme bestehend aus zahlreichen kooperativ arbeitenden Einzelaktoren befinden sich im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Dazu gehören Ultraschallfelder, die in Luft arbeiten und zum Beispiel für kontaktfreie taktile Displays eingesetzt werden können [Hos2010, Bel2016]. Arrays verschiedener PMUTs (piezoelectric micromachined ultrasonic transducers) [Haj2012] und CMUTs (capacitive micromachined ultrasonic transducer) [Khu2011] werden sowohl für die Diagnose mechanischer Strukturen als auch für diagnostische und therapeutische Anwendungen in der Medizin entwickelt. Auch werden sie zur Beeinflussung von Strömungen verwendet. Akustische Levitation und Generierung von Mustern schwebender Partikel und Körper durch gezielte Ansteuerung von akustischen Aktoren sind bereits bekannt, ebenso deren gezielte Bewegung (z.B. Drehung) [Och2014].

Ein weiteres Beispiel des Zusammenwirkens vieler Aktoren bilden Braille-Displays. Im BMBF-Förderprojekt HyperBraille wurden beispielsweise flächige Braille-Displays mit bis zu 9000 aktiven Berührungspunkten (TaxelIn) erforscht (metec AG, [VWB2008]). Alternativ werden in Matrixform angeordnete EAP-Aktoren eingesetzt, welche gleichzeitig als kapazitive Sensoren externe Drücke erkennen. Somit lassen sich komplexe Aktor-Sensor-Systeme konfigurieren, die einen Tastendruck detektieren und diesen durch ein vibrotaktilen Signal dem Benutzer quittieren.

Biologische Bewegungssysteme können bei der Entwicklung kooperativer und mehrstufiger Systeme als Vorbilder dienen. Vorarbeiten dazu sind beispielsweise neuartige Wimpernaktoren der Länge 500 μm basierend auf dem piezoelektrischen Effekt [Pot2012] oder künstliche Zilien bestehend aus superparamagnetischen Teilchen in einer Polymermatrix von ca. 1 mm Länge und 10–20 μm Durchmesser zur magnetischen Aktuierung [Bel2011]. Unter Einsatz elektrischer Kleinantriebe und hochreißfester Fasern wird die Wirkung natürlicher Muskeln und Sehnen sowie deren Bewegungen und Kraftübertragungen nachgebildet [Pal2013, Pal2014]. Durch geometrische Kopplung von Dreh- und Linearbewegungen in Parallelanordnungen dünner biegsamer Elemente bzw. in Faserbündeln kann eine Verdrillaktorik realisiert werden [May2013, May2014].

Alle bisher genannten Systeme profitieren von der Kooperation gleichartiger Mikroaktoren. Hingegen gibt es nur wenige Beispiele zur Kooperation verschiedenartiger Mikroaktoren. In [Zha2016] wird ein Stellelement mit drei Freiheitsgraden vorgestellt, das aus einem thermischen Bimorphfaktor für Bewegungen aus der Ebene heraus und elektrostatischen Kammaktoren zur Positionierung innerhalb der Ebene besteht. Eine Kooperation von induktiver Aktorik zum magnetischen Schweben in z-Richtung mit elektrostatischer Aktorik zur azimuthalen Ausrichtung eines Prüfkörpers wird in [Pol2017] beschrieben. Dabei ist ein Set von zwei coaxialen 3D Spulen unter dem Siliziumsubstrat mit den Elektroden vergraben.

Multiferroische Materialien ermöglichen ebenfalls die Nutzung verschiedener Aktorprinzipien, beispielsweise die Kooperation von ferromagnetischer und ferroelastischer Aktorik zur Erzeugung entgegengerichteter Kräfte in einem monolithischen Bauteil. Auf diesem Konzept basieren Mikroscanner aus ferromagnetischen Formgedächtnislegierungen (FGL), die dadurch extrem hohe Ablenkwinkel und eine breite Durchstimbarkeit der Aktorfrequenz zeigen [Koh2004, P2]. Durch Kaskadierung zweier FGL-Mikroscanner und Kombination mit einer Winkelsensorik konnten zweistufige FGL-Mikroscanner zum Abtasten großer (Ober-)Flächen, demonstriert werden [Koh2007]. Durch Kooperation aktorischer FGL-Schichten mit schmaler und breiter Temperaturhysterese im gleichen Temperaturbereich wurden Aktoren entwickelt, die phasengekoppelte wellenförmige oder wurmartige Bewegungen ausführen [Win2004, P12].

Kooperierende Systeme basierend auf unterschiedlichen Wandlerprinzipien sind auch im Bereich des Micro Energy Harvesting, was man als invertierte Aktorik interpretieren kann, zu finden. Typischerweise wird hier das elektrodynamische mit dem piezoelektrischen Wirkprinzip kombiniert, um einerseits synergetisch zwei Kopplungseffekte zur höheren Energieausbeute zu nutzen [Wis2009], andererseits um durch mechanische Vorspannung ein Einstellen der Resonanzfrequenz zu ermöglichen [Cha2008, Sta2009, Ert2011].

2.3 Stand der Forschung zu bi-/multistabilen Mikroaktorsystemen

Durch Einführung bi-/multistabiler Mechanismen können Systeme ausgelegt werden, die in zwei/mehreren Zuständen ohne äußere Energiezufuhr verharren können und dabei sowohl Energie einsparen als auch eine hohe Bewegungsvielfalt aufweisen [Kin2004]. Bislang wichtige Anwendungen in der Mikrosystemtechnik sind mikromechanische Schalter und Relais.

Im Bereich der Optical MEMS wurden viele bi- oder multistabile Aktoranwendungen entwickelt, entweder zum direkten Schalten von Glasfasern [Hof1999] oder zum indirekten Schalten des optischen Weges mittels Spiegeln. In [Fre2004] wird als Beispiel ein bistabiler Schalter für Multimoden-Glasfasern vorgestellt, der auf einem mechanisch vorgespannten Kniehebelprinzip beruht. Das Schalten zwischen Zuständen erfolgt elektrostatisch, wodurch eine einfache Integration in die Standard-Siliziumtechnologie ermöglicht wird. Durch Kaskadierung von acht elektrostatischen Pull-in Aktoren werden in [Zha2003] in der Summe neun stabile Kippwinkel eines Mikrospiegels erzeugt. In [Hof2001] wurden durch eine Kaskadierung und Kopplung

weicher und steifer Biegestrukturen elektrostatische Aktoren realisiert, die große Stellwege bei kleiner Spannung bistabil schalten können.

Nahezu beliebig viele stabile Positionen werden mit einem Ratschenmechanismus möglich. In [Dao2011] haken die Beine einer käferartigen Struktur in eine Ratschenstruktur ein, welche mittels Kammaktoren elektrostatisch geöffnet oder geschlossen wird. Der Vortrieb erfolgt durch eine mechanische Verformung der filigranen Käferstruktur. In [Meh2015] dient eine passive Ratsche zur Fixierung für einen mikromechanischen Zähler von Beschleunigungsereignissen.

Mit Hilfe von mechanisch bistabilen Hilfsstrukturen können elektrothermische Aktoren aus SU8 pulsformig vertikal als auch horizontal angetrieben werden und verrasten in ihren Ruhepositionen. Nach diesem Prinzip lassen sich ebenfalls Braille-Displays [Win2014, Win2016] aufbauen. Im DFG SPP1337 „Aktive Mikrooptik“ wurden thermomechanische Aktorkonzepte entwickelt, um beliebig einstellbare Prismen für eine variable Strahlablenkung aufzubauen [Leo2015]. In Kooperation mit magnetostatischer Ruhelagefixierung ergibt sich ein bistabiler elektrothermischer Aktor bestehend aus elektrisch beheizten Verformungskörpern aus SU-8 und einer Biegefeder aus galvanisch abgeschiedenem Nickel. Wegen der magnetischen Flussführung wird die Nickel-Biegefeder magnetostatisch an den Ruhepositionen festgehalten. Diese Struktur ist in einer 32-fach-Mikrorelaismatrix erprobt worden [Sta2013].

Bei miniaturisierten Elektromotoren kann Multistabilität durch Maxwell-Kräfte an Grenzflächen mit sich ändernder magnetischer Permeabilität erzeugt werden. In den unbestromten Motoren treten darauf basierend Selbsthaltekräfte aufgrund integrierter Permanentmagnete oder magnetischer Remanenz auf. Heutige Schrittmotoren weisen typisch 200 bis 400 Schritte bzw. stabile Positionen pro 360°-Umdrehung auf. Ansätze zu einer Miniaturisierung hin zu Mikroschrittantrieben werden in [Wal2004] diskutiert.

Membranaktoren aus dielektrischen Elastomeren können durch bistabile Vorspannelemente mit negativem Steigungsbereich Hubvergrößerungen von bis zu einer Größenordnung gegenüber linearen Federelementen erzielen [Hod2013]. Ebenfalls mit Hilfe von bistabilen Elementen lassen sich FGL-Aktorsysteme aufbauen, die durch ein schnappartiges Auslösen sehr schnell schalten. Deren matrixförmige Anordnung führt zur Entwicklung aktiver Oberflächen, etwa taktiler graphischer Displays für die Medizintechnik [Vit2006]. Bistabile Schalter wurden auch durch Kombination antagonistisch arbeitender FGL-Aktoren mit magnetischen Aktoren entwickelt [P3]. Dieses Konzept führte zur Entwicklung bistabiler 2/2 [P4] und bistabiler 3/2 FGL-Mikroventile [Meg2012]. Bistabile FGL-Aktoren wurden darüber hinaus in Mehrschichtsystemen aus FGL-Dünnschichten mit großer Hysterese und Polymerschichten mit Glasübergangstemperatur innerhalb des Temperaturbereichs der Hysterese entwickelt [P14].

2.4 Zusammenfassende Bewertung

Der beschriebene Stand der Forschung zeigt, dass eine Vielzahl an Aktorprinzipien umgesetzt und demonstriert wurde. Das Potenzial kooperativer und bistabiler Aktorsysteme wurde bereits vor längerer Zeit erkannt. Trotzdem steht die intelligente Kopplung verteilter Mikroaktoren zu einem kooperativen, mehrstufigen System weitgehend aus. Es gibt es nur wenige, wenngleich kommerziell sehr erfolgreiche Beispielanwendungen. In den meisten Fällen beschränkt sich die Kooperation jedoch auf wenige Aktoren, z.B. drei Aktoren für die x-, y-, z-Positionierung oder zwei Aktoren, die ein antagonistisches Paar bilden. Zur Umsetzung bistabiler Aktorkonzepte wurden bereits verschiedene Lösungsansätze entwickelt, während die Forschung und Entwicklung multistabiler Aktorsysteme noch in den Anfängen steckt. Hier besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Intrinsische Sensoreigenschaften wurden exemplarisch aufgezeigt. Ein wesentliches Problem der bisherigen Entwicklung ist, dass die meisten Forschungsergebnisse in Einzelprojekten erzielt wurden, die thematisch eng fokussiert waren und dabei den erforderlichen Systemansatz vermissen ließen.

Das hier beantragte Schwerpunktprogramm hat sich zum Ziel gesetzt, sich diesem Problem zu stellen, indem adäquate Lösungsansätze erforscht und demonstriert werden und so die Mikroaktorik vergleichbar zur Sensorik als leistungsfähiges Element zur Lösung zukünftiger technischer Herausforderungen verfügbar wird. Die Erforschung und Entwicklung von KOMMMA soll durch interdisziplinäre Zusammenarbeit von Arbeitsgruppen aus verschiedenen Fachgebieten der Mikroaktorik, Mikrosystemtechnik, Materialwissenschaften, Systemsimulation, Antriebs-, Regelungs- und Systemtechnik in einem hinreichend breit angelegten Forschungsansatz durchgeführt werden. Dabei richtet sich der thematische Fokus auf die systematische Erforschung von Kopplungseffekten, die aufgrund der räumlich begrenzten Anordnung unterschiedlichster Mikroaktoren auftreten, sowie auf Synergieeffekte, die sich aus vielversprechenden Kombinationen von (Mikro-)aktoren und bi/multistabilen Mechanismen ergeben. Um dem Systemansatz gerecht zu werden, sollen dabei sowohl relevante materialwissenschaftliche Fragen, Möglichkeiten zur Nutzung der inhärenten Sensoreigenschaften im kooperativen Aktorsystem als auch relevante Probleme der Regelungs- und Systemtechnik untersucht und beantwortet werden.

5 Inhaltliche Begründung unter Berücksichtigung der Programmziele

5.1 Originalität der wissenschaftlichen Fragestellungen unter thematischen und/oder methodischen Aspekten

Das wissenschaftliche Ziel des beantragten Schwerpunktprogramms liegt in der Erforschung von Kopplungs- und Synergieeffekten, sowie in der Erarbeitung von Entwicklungsmethoden für eine neuen Generation von Mikroaktorsystemen, die aus einem mehrstufigen, kooperativen und/oder multistabilen Aufbau aus gleich- oder verschiedenartigen Aktoren und ggf. Sensoren und weiteren Systembausteinen bestehen. Diese Generation zeichnet sich dadurch aus, dass sie Wirkungsketten über mehrere Längenskalen vom Nanometer- bis in den Zentimeterbereich abdeckt und komplexe Aufgaben mit Kraft-Stellweg-Dynamik-Kombinationen erfüllt, die mit bisherigen einstufigen Aktorkonzepten nicht möglich sind. Das kohärente Zusammenwirken unterschiedlicher Mikroaktoren eröffnet innovative „smarte“ Systemlösungen und neue Funktionalitäten, wodurch eine Brücke hin zu den Erfolgen der heutigen Sensortechnik geschlagen werden soll.

Die Mikrosystemtechnik hat in zahlreiche Anwendungen Einzug gehalten, etwa in die Automobilindustrie (Airbag-Sensoren), Kommunikationstechnik (Lagesensoren, HF-Filter) oder Medizintechnik (Analysesysteme, Lab-on-Chip). Insbesondere in der Anwendung silizium-basierter Prozesse (Boschprozess) und der Entwicklung darauf aufgebauter Mikrosysteme gibt es in Deutschland eine große Expertise. Aktuelle Entwicklungen der Mikrosystemtechnik konzentrieren sich jedoch in besonderem Maße auf Sensoren und Sensorsysteme, nicht zuletzt um dem aktuellen Bedarf (Internet der Dinge, Industrie 4.0) gerecht zu werden, während Mikroaktoren oder gar Mikroaktorsysteme nur in wenigen Fällen (Mikrospiegel, Druckköpfe, Ventile) zum Einsatz kommen. Die aktuell starke Entwicklung von Sensoren in vielen Industrien wird jedoch dazu führen, dass der Bedarf an Aktorik auf kleinem Bauraum in vielen weiteren Anwendungsfeldern signifikant zunehmen wird. Dies belegen sowohl Marktstudien [Yole2015], als auch die zunehmende Anzahl an Forschungsaufträgen, z.B. [EC2017].

Wie in Abschnitt 2 dargestellt, erfolgte die frühe Entwicklung von Mikroaktoren in den meisten Fällen technologiegetrieben. In den letzten Jahren wurden dann zunehmend neue, häufig hybrid integrierte Aktorprinzipien für die Mikrosystemtechnik erschlossen, welche auf festkörperbasierten Wandlermaterialien beruhen. Neue kombinatorische Methoden der Materialwissenschaften haben in den letzten Jahren zu einer Vielzahl vielversprechender Wandlermaterialien für festkörperbasierte Mikroaktoren geführt. So belegen beispielsweise neue Entwicklungen von Formgedächtnislegierungen mit minimaler Hysterese [Cui2006, Zar2010], sowie von ermü-

dungsfreien Formgedächtnislegierungen [P13] die führende Rolle Deutschlands in diesem aufstrebenden Gebiet. In den meisten Fällen handelte es sich bei der Umsetzung derartiger Ergebnisse in Mikroaktoren jedoch um Einzelbauelemente, die entweder allein oder parallel in einem Feld arbeiteten. Deren systematische Kombination zu miteinander kooperativen mehrstufigen Systemen steht jedoch bislang aus. Diese Ausgangssituation steht im Gegensatz zu einem wachsenden Bedarf an innovativen Ansätzen zur Kontrolle von z. B. mechanischen, optischen oder strömungstechnischen Vorgängen auf kleinem Bauraum, der durch anhaltende Miniaturisierung, reduzierten Energieverbrauch und die Zunahme an Funktionsanforderungen hervorgerufen wird.

Bild 2 veranschaulicht die Architektur eines kooperativen mehrstufigen multistabilen Mikroaktorsystems (KOMMMA). Zum Vergleich ist links die Struktur eines heute verwendeten Einzelaktors dargestellt, der von einem Energiesteller versorgt und über eine Signalverarbeitung gesteuert/geregt wird. Der Mikroaktor selbst besteht aus einem Energiewandler und einem Effektor, der Eingriffe in einen Prozess (im allgemeinen Änderungen von Substanzströmen oder Energieflüssen) vornimmt. Eine optionale, zumeist externe Sensorik erlaubt die Überwachung der Aktorfunktion durch Erfassung von Ist-Größen, um eine Regelung zu ermöglichen.

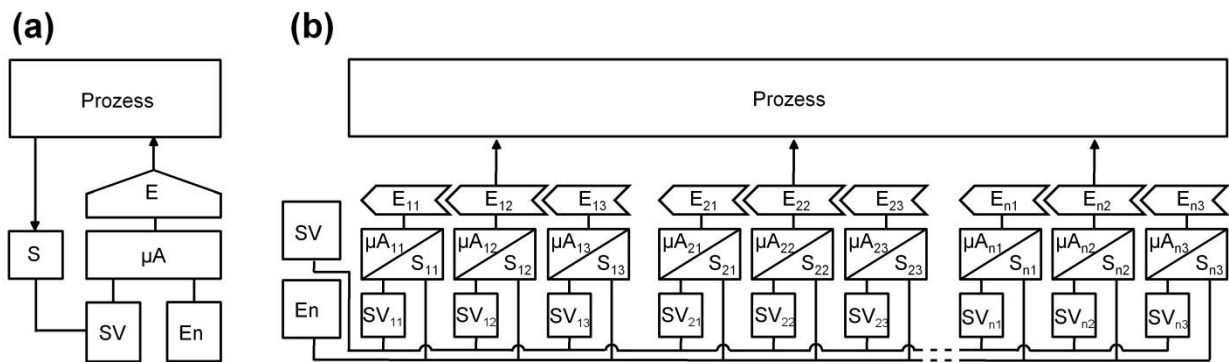


Bild 2: Struktur eines Einzelaktors (a) und Architektur eines kooperativen mehrstufigen multistabilen Mikroaktorsystems (KOMMMA) (b). Legende: μA – Mikroaktor, S – Sensor, SV – Signalverarbeitung, E_n – Energiesteller, E – Effektor.

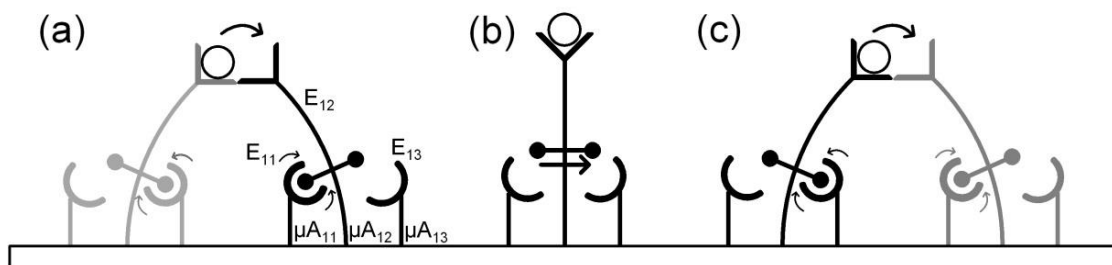


Bild 3: Beispiel zu einem KOMMMA: Künstliche Zilien bestehend aus Biegeaktoren (μA_{12} etc.) und Effektoren (E_{12} etc.) bilden durch Kooperation ein Transportsystem (Prozess). Zusätzliche Mikroaktoren (z.B. μA_{11} und μA_{13}) kooperieren auf einer tieferen Ebene, um Bistabilität zu erreichen. Die Funktion des Transportsystems wird durch die Sequenz (a)-(c) veranschaulicht.

Das KOMMMA im rechten Teil des Bildes besteht dagegen aus zahlreichen, im Allgemeinen verschiedenen Mikroaktoren, die hier auf zwei unterschiedlichen Ebenen miteinander kooperieren. Während auf einer höheren Ebene Eingriffe in einen Prozess der Umgebung

stattfinden, kooperieren weitere Mikroaktoren auf einer tieferen Ebene, z.B. um multistabile Zwischenpositionen zu realisieren. Ein mögliches Beispiel dazu ist in Bild 3 gezeigt. Die Energieversorgung wird zentral durchgeführt, während die Signalverarbeitung sowohl zentral als auch teilweise direkt an jedem Mikroaktor/Sensor erfolgt. Vorzugsweise werden die inhärenten Sensoreigenschaften der Aktor-Bauelemente genutzt.

Das beantragte Schwerpunktprogramm beabsichtigt, den wichtigen Entwicklungsschritt vom Einzelaktor hin zu KOMMMAs voranzubringen durch Bündelung unterschiedlicher Expertisen und Stimulierung der Erforschung von Kopplungs- und Synergiemechanismen sowie deren Umsetzung in neue Systemarchitekturen und mikrotechnische Anwendungen.

Entsprechend sind die **wichtigsten Ziele** des Programms,

- (a) ein **grundlegendes Verständnis von Kopplungseffekten und Querempfindlichkeiten** zu erreichen, die aufgrund der räumlich begrenzten Anordnung unterschiedlichster Mikroaktoren, funktioneller Untereinheiten und Funktionsmaterialien auftreten;
- (b) vielversprechende **Kombinationen von (Mikro-)aktoren und Sensoren auf verschiedenen Längenskalen und multistabile Mechanismen** zu erforschen und zu identifizieren, sowie den sich daraus ergebenden Mehrwert für das Gesamtsystem zu verstehen;
- (c) **Systemarchitekturen** zur Realisierung kooperativer mehrstufiger Aktorsysteme zu untersuchen; und
- (d) **Entwicklungsmethoden für konkrete Anwendungen** bereitzustellen, sowie Verfahren zur mikrotechnischen Integration und Funktionalisierung von Aktormaterialien und Hilfsstrukturen zu entwickeln..

Zum Erreichen dieser Ziele ist es erforderlich, die Methoden und Werkzeuge verschiedener Fachgebiete zu bündeln einschließlich der Mikroaktorik, Mikrosystemtechnik, Materialwissenschaften, Modellbildung/Simulation, Antriebs-, Regelungs- und Systemtechnik.

Die systematische Kombination unterschiedlicher Aktorprinzipien zu kooperativen mehrstufigen Systemen wird begünstigt durch inhärente Sensoreigenschaften von konventionellen Aktoren und Wandlermaterialien. Im Falle der Regelung derartiger Aktorsysteme haben sich hier die Begriffe „sensorless“ und „self-sensing“ etabliert. Aktoren übernehmen dabei zugleich Sensoraufgaben. Ergänzende Sensoren werden dadurch in der Regel verzichtbar, was einem miniaturisierten Systemdesign entgegenkommt. Über diesen Ansatz lassen sich mit Hilfe geeigneter Parameteridentifikationsverfahren neben der aktuierten Bewegung inkl. Kraft bzw. Drehmoment aus dem System oft noch weitere Kennwerte extrahieren, die einer Zustandsbewertung dienen können und darüber weitere Regeleingriffe und Verknüpfungen ermöglichen. Die Übertragung dieser im makroskopischen Bereich vielfach bereits etablierten Ansätze in kooperative mehrstufige multistabile Mikroaktorsysteme hat für das beantragte Schwerpunktprogramm den Charakter einer Schlüsseltechnologie.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in Deutschland erhebliches Know-How zu einzelnen Teilaspekten der Mikroaktorik und Mikroaktorsysteme vorliegt, aber der interdisziplinäre Dialog zur Nutzung dieser konzentrierten Expertise noch erheblich ausbaufähig ist. Die Erforschung kooperativer mehrstufiger Mikroaktorsysteme ist hervorragend geeignet, einen derartigen Dialog anzuregen und zu organisieren, was das beantragte SPP sowohl aus wissenschaftlicher Sicht als auch aus forschungspolitischer Sicht attraktiv macht.

5.2 Eingrenzung der wissenschaftlichen Fragestellungen unter Berücksichtigung der Laufzeit eines Schwerpunktprogramms

Während die methodischen Anforderungen an die innovative Erforschung kooperativer mehrstufiger Mikroaktorsysteme für einen breit angelegten Forschungsansatz sprechen, ist eine thematische Fokussierung für ein erfolgreiches Forschungsprogramm erforderlich. Im Vordergrund stehen daher die Kernthemen Kopplungseffekte, Synergieeffekte, Systemarchitektur und Demonstratorentwicklung, sowie die erforderlichen Technologien und Integrationsverfahren (siehe Kap. 5.2.1 bis 5.2.4). Die ersten beiden Kernthemen sind schwerpunktmäßig für die ersten drei Jahre vorgesehen. Aufbauend auf den dabei erarbeiteten Grundlagen sollen die Kernthemen Systemarchitektur und Demonstratorentwicklung in der zweiten Förderperiode in den Fokus rücken.

Projektanträge sollten möglichst mehrere der genannten Kernthemen adressieren. Dabei werden Gemeinschafts- und Paketanträge bevorzugt. Die Zahl der Antragsteller sollte die erforderliche komplementäre Expertise für das beantragte Projekt widerspiegeln. Im Vordergrund stehen innovative Lösungsansätze, die sowohl neue Synergien und Funktionalitäten aufzeigen, als auch die Potenziale der Ressourceneffizienz erkennen lassen.

Folgende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollen explizit nicht betrachtet werden:

- Einzelaktoren,
- reine Technologie-Entwicklungen,
- reine Materialforschung und –entwicklungen,

Darüber hinaus sind folgende Einschränkungen vorgesehen:

- die Entwicklung von Simulationswerkzeugen wird nur im Zusammenhang mit der Entwicklung von KOMMMA berücksichtigt, wobei ein intensiver Austausch zwischen experimentell bestimmten und simulierten Systemeigenschaften gewährleistet sein soll,
- die Entwicklung von Cyberphysical Systems wird ebenfalls nur im Zusammenhang mit der Entwicklung von KOMMMA berücksichtigt,
- Roboter und Robotersysteme werden nicht berücksichtigt. Dies betrifft jedoch nicht aktorische Subsysteme für mögliche Anwendungen in der Robotik, wie z.B. mikrotechnische (Fort-)bewegungssysteme, Greifersysteme oder haptische Systeme.

5.2.1 Grundlegendes Verständnis von Kopplungseffekten und Querempfindlichkeiten

Wie in Bild 2 schematisch gezeigt, werden Systemarchitekturen angestrebt, bei denen mehrere verschiedene Mikroaktoren miteinander kooperieren. Dies kann entweder durch serielle oder parallele Kopplung erfolgen. Um eine Kooperation auf unterschiedlichen Ebenen zu gewährleisten, ist eine eng benachbarte Anordnung der Mikroaktoren erforderlich. Dies führt unweigerlich zur gegenseitigen Beeinflussung etwa durch mechanische Spannungsfelder, thermisches Übersprechen, magnetische oder elektrische Kopplung. Im Vergleich zu elektronischen Chips, bei denen im Wesentlichen elektrische und thermische Kopplungseffekte und Querempfindlichkeiten mit zunehmender Miniaturisierung wichtig werden, kommen bei der Integration zahlreicher verschiedener Mikroaktoren also zusätzliche physikalische Größen zum Tragen. Dies macht eine neue multiphysikalische Betrachtungsweise erforderlich, wobei dem Verständnis von materialwissenschaftlichen Zusammenhängen und Werkstoffeigenschaften eine besondere Bedeutung zukommt. Dies ist insbesondere bei Nutzung festkörperbasierter Mikroaktoren auf der Basis multiferroischer Wandlermaterialien der Fall, z.B. ferroelektrische, -elastische oder –magnetische Materialien, da diese sich durch starke intrinsische Kopplungseffekte auszeichnen.

Ein Ziel der Arbeiten ist es daher, ein systematisches Verständnis der multiphysikalischen Phänomene und Kopplungseffekte in KOMMMA zu erarbeiten, einschließlich deren Abhängigkeit von Herstellungsparametern und Betriebsparametern. Dies erfordert zum einen die Entwicklung geeigneter experimenteller Verfahren zur gleichzeitigen Erfassung multiphysikalischer Größen, zum anderen die Erstellung geeigneter Modelle und die Entwicklung von Simulationsverfahren. Bislang wurden multiphysikalische Materialmodelle entwickelt, die eine lokal aufgelöste, aber numerisch aufwändige Vorhersage des Einzelsystems erlauben. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, in wieweit ordnungsreduzierte Modelle geeignet sind. Im Bereich der ordnungsreduzierenden Simulationsverfahren existiert derzeit kein universeller Ansatz, welcher eine Modellierung sämtlicher multiphysikalischer Kopplungseffekte eines Mikroaktorsystems ermöglicht. Weiterhin ist die Kopplung reduzierter Modelle sowie deren geometrische Parametrisierung weitgehend ungelöst. Eine weitere Frage in diesem Zusammenhang ist es, in wieweit physikalisch gekoppelte Systeme durch Co-Design von Aktoren und Regler mit vertretbarem Kommunikationsaufwand entkoppelt werden können.

Ein weiteres Ziel ist es, Kopplungseffekte gezielt für Aktorfunktionen und/oder inhärente Sensorfunktionen zu nutzen. Beispielsweise hängt die Arbeitsdichte von festkörperbasierten Mikroaktoren (z.B. piezoelektrisch / Magnetostriktion / Formgedächtnis) nicht nur von den direkten Eingangsgrößen (elektrisches / magnetisches / Temperatur-Feld) ab, sondern zeigt zahlreiche Querempfindlichkeiten. So können die Ausgangsgrößen Kraft und Stellweg in den genannten Mikroaktoren durch mechanische Vorspannung oder Temperaturoptimierung zum Teil deutlich gesteigert werden. Inhärente Sensorprinzipien können in gekoppelten Aktorsystemen gezielt genutzt werden, etwa zur piezoelektrischen Detektion eines Magnetfeldes in gekoppelten magnetostriktiven und piezoelektrischen Schichten. Zur Untersuchung dieser komplexen Zusammenhänge ist eine enge Kooperation von Aktor-/Sensorentwicklung und der Entwicklung/Charakterisierung von Wandler- und Funktionsmaterialien erforderlich.

Durch Kaskadierung von Aktoren oder Aktorgruppen unterschiedlicher Baugrößen, bzw. unterschiedlicher Stellwegsbereiche können neuartige Wirkungsketten über mehrere Längenskalen vom Nanometer- bis in den Zentimeterbereich realisiert werden. In diesen Systemen können Querempfindlichkeiten entlang der gesamten Wirkungskette auftreten, die besondere Strategien zur Kontrolle erfordern. Dabei kommt der gleichzeitigen messtechnischen Erfassung der Ein- und Ausgangsgrößen auf den verschiedenen Längenskalen eine besondere Bedeutung zu. Damit ist die Herausforderung verbunden, ein skalenübergreifendes inhärentes Sensorsystem zu entwickeln, das gleichzeitig Regeleingriffe an jeder Stelle der Wirkungskette erlaubt.

5.2.2 Systematische Untersuchung von Synergieeffekten

Ein weiterer Fokus richtet sich auf Synergieeffekte, die aus der Kooperation von Mikroaktoren und Funktionsmechanismen folgen und für das Gesamtsystem einen Mehrwert ergeben. Als Ergebnis dieser Kooperation können völlig neue Strukturen entstehen und manipuliert werden, es können Produkte und Effekte entstehen, die noch nicht bekannt sind oder bisher noch nicht genutzt werden. Synergieeffekte kooperativ betriebener verteilter Systeme eröffnen darüber hinaus Einsparpotentiale. Ein Beispiel ist das Ablöseverhalten der Strömung insbesondere bei Start und Landung eines Fluggerätes. Dabei müssen die intelligent kooperierenden Aktoren gemeinsam nur einen Bruchteil des fluidischen Momentes und der Energie in die Strömung einbringen, um denselben Effekt zu erzielen wie eine einzige Zeile großer und leistungsstarker Aktoren [Ble2016]. Die Herausforderung besteht darin, derartige Synergieeffekte für verschiedene Kopplungsvarianten von Mikroaktoren zu identifizieren, zu verstehen und nutzbar zu machen.

Synergie durch Kopplung gleichartiger Mikroaktoren: Durch parallele Anordnung zahlreicher gleichartiger Aktoren entstehen Aktorfelder, wie z.B. Zilien-(Wimpern-)aktoren, Greifersysteme, Felder von Spiegelaktoren oder akustischer Mikroaktoren. Durch koordinierte

individuelle Ansteuerung der Mikroaktoren können zeitliche und räumliche Aktuierungsmuster erzeugt werden, um kooperativ mechanische, optische oder fluidische Systemfunktionen zu erzeugen. Ein Beispiel aus der Mikromechanik sind kooperative Greifersysteme mit inhärenter Sensorik für die sichere Handhabung von Zellen, die sowohl den Stellweg der Greifbacken als auch deren Kraftwirkung auf das gegriffene Objekt detektieren [Lee2008]. Durch Synergie von Greifen und Kraftdetektion könnte hier eine frühzeitige Selektion von Zellen mit unerwünschten Eigenschaften erfolgen. Durch Kooperation elektromagnetischer Mikroaktoren zur magnetischen Levitation können neuartige Transport- und Positioniersysteme für Mikroobjekte mit vielen Freiheitsgraden und großen Reichweiten aufgebaut werden. Im Bereich der Mikrooptik ergeben sich interessante Möglichkeiten zur Korrektur von Aberrationen (Wellenfrontstörungen) bei Messaufgaben an fluktuierenden oder stark streuenden Grenzflächen sowie der Erzeugung komplexer Wellenfronten. Ähnliche Synergieeffekte sind durch Entwicklung akustischer Mikroaktorfelder zu erzielen, die fokussierte Ultraschallfelder erzeugen. In der Mikrofluidik sind flächig verteilte Felder elektro-fluidischer Mikroaktoren (z.B. Jet-Aktoren [Bau2017]) von Interesse, die kohärente Strukturen in Strömungen (z.B. Wirbel) erzeugen. Durch Kooperation können bestimmte Strömungsstrukturen gezielt erhalten bzw. verstärkt werden oder unerwünschte Strömungsstrukturen unterdrückt werden. Die Eigenschaften derartiger Systeme und Mechanismen, ihre Dynamik und ihre Wechselwirkungen sind weitgehend unerforscht und deren Potenziale noch nicht ausgelotet.

Synergie durch Kopplung verschiedenartiger Mikroaktoren: Durch Kopplung verschiedenartiger Mikroaktoren/Mikroaktorfelder können mehrere physikalische Wirkmechanismen genutzt werden, um kooperativ neue Systemfunktionen zu erzeugen. Ein Beispiel aus der Mikromechanik ist die Kopplung von Membranaktoren mit Aktoren zur bistabilen Vorspannung, wodurch einerseits starke Hubvergrößerungen, andererseits schnelle Schaltvorgänge und stabile Endpositionen erzielbar sind. In analoger Weise können verschiedenartige festkörperbasierte Mikroaktoren miteinander gekoppelt werden. Durch Kombination von Formgedächtnis-Materialien mit unterschiedlichen Hysteresebreiten können Mikroaktorsysteme untersucht werden, die unterschiedliche Wege bei der Aufheizung bzw. der Abkühlung durchlaufen können, wodurch die Aktor-Auslenkungen in komplexe Bewegungen umgesetzt werden. Weitere vielversprechende Möglichkeiten ergeben sich durch Kombination dynamisch unterschiedlicher Aktorprinzipien, z.B. hochdynamischer Piezoaktoren und „sanfter“ dielektrischer Elastomeraktoren, um das Schwingungsverhalten aktiv zu beeinflussen und Kraftspitzen abzumildern. Die Entwicklung derartiger Kopplungen erfordert die Modellierung des Systemverhaltens auf sehr unterschiedlichen Zeitskalen, die sich um mehrere Größenordnungen unterscheiden.

Synergie durch Kaskadierung von Mikroaktoren: Durch Kaskadierung von Mikroaktoren/Mikroaktorfeldern entstehen komplexe Mikroaktorsysteme, die neuartige Wirkungsketten über verschiedene Funktionsebenen sowie über mehrere Längenskalen ermöglichen. So können Mikroaktoren mit fluidischen Funktionen (Transport von Partikeln, Zellen) mit Mikroaktoren mit mechanischen Funktionen (Partikelsortierung, Zellhandhabung) gekoppelt werden. Zusätzliche Synergien entstehen dabei durch Nutzung der inhärenten Sensorik, z.B. zur Detektion von Position, Kraft, Temperatur. Zum Transport von Partikeln über größere Entfernungen sowie zur Sortierung von Partikeln in einem größeren Parameterbereich ist die Kooperation mehrerer kaskadierter akustischer Mikroaktorfelder von Interesse. Besondere Aufmerksamkeit kommt dabei dem Überlapp der Randbereiche der einzelnen Mikroaktorfelder zu, bei denen z.B. Partikel „übergeben“ werden und die Nachbararrays direkt kooperieren. Dabei entstehen zusätzliche Synergien durch inhärente Sensorik: Der ‘Feedback’ über den Erfolg einer Kooperation kann direkt über die Veränderungen des akustischen Feldes miteinbezogen werden. Die mehrstufige Anordnung von Aktoren erlaubt wesentlich größere Stellwege als dies mit einem einzelnen Aktor möglich wäre. Insbesondere durch Kopplung von Aktoren zur Grob-

und Feinpositionierung können Transport- und Bewegungssysteme über einen weiten Stellwegbereich mit hoher Genauigkeit realisiert werden. Eine besondere Herausforderung stellt die Entwicklung mehrstufiger Aktorsysteme mit dreidimensionaler (3D) Gestalt und 3D Bewegungsspielraum dar, wie z.B. 3D mikrostrukturierte magnetische Nanocomposite [Schw2017]. Durch Kombination derartiger Netzwerkstrukturen in Multilagensystemen könnten mehrstufige Mikroaktorsysteme generiert werden, bei denen jede Stufe auf einen anderen Stimulus reagiert (Magnetfelder, Licht (cis/trans-Isomerisierung von Azoverbindungen), Feuchtigkeit (Quellen von Hydrogelen)).

Synergie durch multistabile Mikroaktorsysteme: Durch Kooperation von Mikroaktoren können insbesondere multistabile Systeme aufgebaut werden, um komplexe Bewegungen mit stabilen Zwischenpositionen zu ermöglichen. Dies kann z.B. gelingen, in dem ein Läufer in einem Rasten-System geführt wird und so multistabil unterschiedliche Lagen einnehmen kann. Das Rasten bzw. die Rastfreigabe wird durch eine 'digitale' Aktorik mit hinreichend großer Kraft bei eher kleinem Stellweg realisiert. Der Transport von Lage zu Lage erfolgt dann nach Freigabe durch ein zweites Aktorsystem, vorzugsweise mit großem einstellbarem Stellweg. Wichtige Forschungsthemen hier sind die Auswahl geeigneter Aktoren für die Rastmechanismen, die Erforschung von Führungs- und Lagersystemen, um eine reproduzierbare, multistabile und mehrstufige Aktorik zu erzielen, sowie der Aufbau kooperativer Aktorketten, die den Läufer zwischen den Rastpositionen übergeben und mit dem Rastsystem synchronisiert sind. Vielversprechende Konzepte im Bereich der festkörperbasierten Mikroaktorik liegen in der Entwicklung von Verbundschichten aus Formgedächtnislegierungen mit unterschiedlichen Hysteresebreiten und Polymeren mit angepasster Glasübergangstemperatur sowie in der Kombination von Mikroaktoren aus Formgedächtnis-Dünnschichten und Formgedächtnispolymeren. Ein weiteres Konzept sind miniaturisierte Verdrillaktoren (Kombination von Aktor und Verdrillschnur durch Reihen- und/oder Parallelschaltungen) unter Nutzung elektromagnetischer Miniatur-Schrittmotoren. Multistabilität kann darüber hinaus diskontinuierlich durch abrupte freie Bewegung und Anhalten (Schießen und Fangen) realisiert werden. In der Mikroaktorik ist beides bisher nicht erforscht.

Simulation von Synergieeffekten: Die vorgestellten Konzepte zeigen die enorme Vielfalt an Möglichkeiten, die sich durch Kooperation von Mikroaktoren und Funktionsmechanismen ergeben. Durch das Zusammenspiel mehrerer Wirkmechanismen auf unterschiedlichsten Längenskalen entsteht ein hoher Komplexitätsgrad, der eine Herausforderung für klassische numerische Simulationstechniken darstellt. Ein Forschungsziel ist hier die Entwicklung reduzierter Modelle für einzelne Teilkomponenten und physikalischer Domänen, sowie deren Kopplung in Rahmen einer Systemsimulation. Multistabile Mikroaktorsysteme werden durch nichtlineare Modelle abgebildet, deren mathematische Ordnungsreduktion weitgehend ungelöst ist. Daher ist ein Verfahren zur Reduktion solcher Modelle zu entwickeln. Darüber hinaus sind physikalisch motivierte Modelle für diskrete Elemente (lumped elements) mit geringem Rechenzeitbedarf essentiell, die insbesondere dynamische Effekte berücksichtigen. Forschungsziele sind dabei z.B. die automatische Parametergenerierung durch optimierte Messprotokolle und adaptive Parameteranpassung während des Betriebs mit lernenden Algorithmen. Wegen Hysterese und Alterungseffekten liefert diese einen wichtigen Beitrag für ein robustes Gesamtsystem.

5.2.3 Untersuchung von Systemarchitekturen

Ein wesentlicher Aspekt des SPPs ist seine insgesamt ingenieurwissenschaftliche Ausrichtung. Ziel ist die Entwicklung neuer Architekturen, die unterschiedliche Mikroaktoren und Funktionsmechanismen einbeziehen, einen mehrstufigen und/oder multistabilen Aufbau besitzen, sowie intelligente Funktionen ermöglichen. Dabei kann es sich z.B. um kohärente Strukturen aus miteinander kooperierenden Aktorfeldern handeln, die etwa mechanische,

optische oder strömungstechnische Vorgänge kontrollieren, wobei das System selbst zum Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen wird.

Dabei kommen dem Design und der Anordnung der Mikroaktoren, funktioneller Untereinheiten und Funktionsmaterialien eine zentrale Bedeutung zu, um Kopplungs- und Synergieeffekte gezielt zu nutzen, wobei Querempfindlichkeiten minimiert und inkompatible Herstellungsprozesse vermieden werden. Das Systemdesign schließt die gleichzeitige Berücksichtigung einer Sensorik ein, die Aktorfunktionen und deren Auswirkung erfasst. Dabei sind die erarbeiteten Konzepte zur Simulation von Kopplungs- und Synergieeffekten auf den konkreten Anwendungsfall zu übertragen. Darüber hinaus sind die Schnittstellen zum Anwendungsprozess (Effektoren) sowie zur Peripherie (Energienesteller, Signalverarbeitung/ Regelung) zu berücksichtigen. Durch Einsatz und Weiterentwicklung von Kommunikationstechnologien sowie (de-)zentralen Steuerungssystemen soll eine intelligente Gesamtfunktion ermöglicht werden. Ein Forschungsziel dabei ist die Bereitstellung von Entwurfsmethoden für das Co-Design von Mikroaktoren und Regler. Ausgangspunkt können dabei etablierte Entwurfsverfahren für nichtlineare Systeme (Zustandsraums-Darstellung, Zwei-Freiheitsgrade-Entwurf, Methoden der exakten Linearisierung) sein, die um den Aktorentwurf erweitert werden. Bei der Erweiterung auf kooperative Systeme können ebenfalls bekannte Ansätze, z.B. die Ein-Ausgangs-entkopplung nichtlinearer Systeme, genutzt werden, die es ermöglichen, physikalisch verkoppelte Systeme durch den Reglerentwurf zu entkoppeln.

5.2.4 Bereitstellung von Entwicklungsmethoden für mikrosystemtechnische Anwendungen

Eine vierte Eingrenzung ergibt sich durch das Ziel, die erarbeiteten Systemarchitekturen, sowie die dort umgesetzten Kopplungsmechanismen und Synergieeffekte für konkrete Anwendungen weiterzuentwickeln. Dies schließt die dazu erforderlichen Technologien und Integrationsverfahren mit ein. Durch gezielte Anwendung und Weiterentwicklung paralleler Fertigungsmethoden der Mikrotechnik und die mikrotechnische Integration und Funktionalisierung von Aktormaterialien sollen Einsparpotenziale aufgezeigt werden. Die Auswirkungen von Materialeigenschaften und Designgrenzen, sowie Technologien und Herstellungstoleranzen auf die Systemeigenschaften sind zu untersuchen. Im Vordergrund stehen innovative Ansätze, die sowohl neue Synergien und Funktionalitäten aufzeigen, als auch die Potenziale der Ressourceneffizienz erkennen lassen.

Aufgrund der Vielfalt an Möglichkeiten, die sich durch die Kooperation unterschiedlichster Mikroaktoren und Funktionsmechanismen ergeben, sind die Anwendungsmöglichkeiten äußerst vielfältig und in ihrer Breite derzeit nicht absehbar. Ein hohes Entwicklungspotenzial wird insbesondere für folgende Mikroaktorsysteme identifiziert:

- Mikromechanische Systeme: Skalenübergreifende Positioniersysteme, 3D Positioniersysteme, multistabile Bewegungssysteme, Greifersysteme, frei schwebende Transportsysteme (magnetische/akustische Levitation), verteilte Transportsysteme (Zilienaktorik), Mikromontage-Systeme, haptische Systeme (Displays, Steuerung in Mensch-Maschine-Schnittstellen), künstliche Muskeln
- Mikrooptische Systeme: Frei schwebende optische Systeme (z.B. Mikrospiegel zum Scannen mit Sechs-Achsen Freiheitsgrad und großen Ablenkwinkeln), dreidimensionale Schwingungskontrolle (portable/mobile optische Systeme), Aberrationskorrektur-Systeme (fluktuierende und/oder stark streuende Grenzflächen), verteilte adaptive Mikrooptik, Multi-Fokus-Mikroskopie
- Mikrofluidische Systeme: Transport, Sortierung und ggf. Identifikation von Partikeln (Diagnose und Therapie in der Medizin, Medikamentenherstellung in der Pharmazie, Mikro-

Verfahrenstechnik), Strömungsbeeinflussung (Ablösekontrolle, Widerstandsreduktion in transitionellen und turbulenten Grenzschichten), Multifokus-Ultraschall-Messtechnik, kaskadierte Mikrovakuumpumpen

5.3 Kohärenz der geplanten Forschungsaktivitäten

Die Komplexität des Forschungsthemas erfordert eine neue multiphysikalische Betrachtungsweise, die materialwissenschaftliche Zusammenhänge und Werkstoffeigenschaften, ingenieurwissenschaftliche Methoden des Systemdesigns, mathematische Methoden zur Systemsimulation, sowie Mikrosystemtechniken einschließt. Die vielfältigen Aspekte erfordern eine enge, interdisziplinäre Zusammenarbeit von Ingenieuren/innen, Werkstoffwissenschaftlern/innen, Physikern/innen und Chemikern/innen. Die Fragestellungen des Schwerpunktprogramms umfassen einerseits die Grundlagenaspekte, die in einem System aus vielen unterschiedlichen Mikroaktoren zu berücksichtigen sind (Analyse von Kopplungseffekten/-Querempfindlichkeiten und Synergieeffekten), andererseits darauf aufbauend die ingenieurwissenschaftlichen Aspekte zur Realisierung neuartiger KOMMMAs (Synthese von Systemarchitekturen, Bereitstellung von Entwicklungsmethoden, Aufbau und Betrieb von Demonstratoren). Nur durch eine kohärente Betrachtung der beiden Aspekte können tragfähige innovative Lösungen entwickelt werden.

Im Bereich der Grundlagenaspekte bestehen zahlreiche Verknüpfungspunkte für eine kohärente Zusammenarbeit. Um eine Kooperation von Mikroaktoren zu erzielen, sind Wandlermaterialien und geeignete Funktionsmaterialien zu kombinieren. Dafür ist eine enge Zusammenarbeit von der Materialentwicklung und Mikrostrukturierung, über die Charakterisierung und Umsetzung in Werkstoffe bis zu deren Integration vorgesehen. Weitere Verknüpfungen bestehen zwischen der Untersuchung von Mechanismen (parallele/serielle Kopplung, bi-/multistabil, inhärente Sensorik) und darauf aufgebauter Aktor-Subsysteme und der Entwicklung multiphysikalischer Modelle zu deren Beschreibung. Zur Nutzung unterschiedlichster Synergieeffekte ist eine enge Verknüpfung verschiedener Funktionsebenen (mechanisch, fluidisch, thermisch, magnetisch, elektrisch, optisch) über mehrere Längenskalen erforderlich, die durch enge Zusammenarbeit entsprechend unterschiedlicher Fachdisziplinen erzielt wird.

Im Bereich der Systementwicklung wird insbesondere das Know-How unterschiedlicher Fachdisziplinen benötigt, um kohärent die angestrebte Systemfunktion in der konkreten Anwendung zu erreichen. Wichtige Verknüpfungspunkte bestehen sowohl zwischen Systemdesign, -simulation und -charakterisierung als auch zwischen Herstellungstechnologien/Integrationsverfahren und Systemcharakterisierung. Darüber hinaus ist eine enge Zusammenarbeit zwischen den Bereichen Mikrosystementwicklung/ Charakterisierung und Regelungs-/Systemtechnik (Kommunikationstechnologien, (de-)zentrale Steuerungssysteme) geplant.

Zur Gestaltung der Zusammenarbeit/Netzwerkbildung sind verschiedene Konzepte vorgesehen (s. 5.4). In der ersten Projektphase sind Verbundprojekte aus mindestens zwei der vier Themenbereiche (Mikroaktoren, Mikrosysteme, Materialwissenschaften, Modellbildung/Simulation, Regelungs-/Systemtechnik) erwünscht, in der zweiten Projektphase sind sie Voraussetzung.

5.4 Konzepte zur Gestaltung der interdisziplinären und ortsübergreifenden Zusammenarbeit/Netzwerkbildung

Interdisziplinärer Austausch und Wissenstransfer erfordern besondere Maßnahmen, um vorhandene Barrieren bedingt durch unterschiedliche Methoden und Konzepte abzubauen. Um den Erfolg des Programms zu sichern, ist es daher wichtig, Forschungsverbünde über die Fachgrenzen hinweg zu generieren. Dazu sind verschiedene Instrumente vorgesehen:

- Vernetzungs-Workshop: Bereits vor der Antragstellung ist ein Austausch interessierter

Wissenschaftler/innen im Rahmen eines eintägigen Workshops geplant, um Dopplungen zu vermeiden, bzw. Synergien zu erkennen und mögliche Kooperationen anzubahnen.

- Plenarveranstaltungen: Alle Mitglieder des Programms, sowie externe international renommierte Experten/innen der verschiedenen Fachgebiete werden jährlich eingeladen, um jeweils über die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse, bzw. in Übersichtsvorträgen über neue Entwicklungen und Erkenntnisse zu referieren.
- Sommerschulen: Jeweils in der Startphase jeder geplanten Förderperiode sollen Sommerschulen für junge Wissenschaftler/innen (Doktoranden/innen, Postdocs) stattfinden, die zur Einarbeitung, zum Wissenstransfer sowie zur Vernetzung dienen.
- Thematische Fokustreffen: Um den eher technischen und fachspezifischen Austausch voranzubringen, soll innerhalb der Fokusbereiche (mikromechanische, mikrooptische, mikrofluidische Systeme) jeweils ein eintägiges Treffen jährlich stattfinden.
- Gastaufenthalte: Der Austausch zwischen verschiedenen Arbeitsgruppen wird besonders unterstützt. Dies schließt insbesondere zeitlich begrenzte Aufenthalte von Doktoranden/innen in einem anderen Labor ein, wofür Mittel aus dem zentralen Projekt zu Verfügung gestellt werden.
- Workshops: Mit Hilfe eines Workshops am Ende jeder geplanten Förderperiode im Rahmen einer (inter-)nationalen Tagung (Mikrosystemtechnik-Kongress, Actuator) sollen die Ergebnisse von KOMMMA vor einem breiten Fachpublikum adressiert und dabei die Sichtbarkeit des Programms erhöht werden.
- Internetauftritt: Die WEB-Seite des Programms wird nicht nur über Workshops, Publikationen und neue Entwicklungen informieren, sondern den Programmteilnehmern die Vorträge der Plenarveranstaltungen und Fokustreffen zur Verfügung stellen.

5.5 Maßnahmen zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, Förderung von Wissenschaftlerinnen, Angebote zur Familienfreundlichkeit

Eines der wichtigsten Ziele des SPPs ist die Unterstützung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Verschiedene Maßnahmen sind vorgesehen, um dessen Ausbildung zu fördern, um Forschungsarbeiten zu unterstützen und um die Zusammenarbeit zwischen jungen Forschergruppen zu stärken. Dazu zählen insbesondere *Sommerschulen*, *Plenarveranstaltungen* und *Thematische Fokustreffen* (s. 5.4). Während der Plenarveranstaltungen sind zusätzliche Schulungen (wissenschaftliches Schreiben, Präsentieren, Fördermaßnahmen) ausschließlich für den wissenschaftlichen Nachwuchs vorgesehen. Der Koordinator unterstützt junge Projektleiter/innen in der Organisation von *Fokustreffen* und *internationalen Workshops*, um deren Sichtbarkeit und Organisationskompetenz zu steigern. In den im Programm besonders unterstützten Verbundprojekten profitieren junge Wissenschaftler/innen darüber hinaus von regelmäßigen *Gastaufhalten* und Arbeitstreffen.

Die Förderung gleicher Chancen für alle Teilnehmer des Programms unabhängig von ihrem Geschlecht, Alter oder Nationalität ist eine ausdrückliche Verpflichtung. Neben der üblichen Unterstützung wie die Wahl eines/er Gleichstellungsvertreters/in und von Mentoren/innen sowie Kinderbetreuung während unserer Veranstaltungen, ist eine zusätzliche Maßnahme speziell für Bedürfnisse der Mikrosystemtechnik vorgesehen. Die Mikrosystemtechnik zeichnet sich dadurch aus, dass ein hoher Anteil der Arbeiten in Reinraumlabor und mit diversen Chemikalien, die z.T. erbgutverändernd und fruchtschädigend sind, erfolgt. In der Regel wird der wissenschaftlichen oder technischen Mitarbeiterin sofort nach Bekanntwerden einer Schwangerschaft untersagt, in den Bereichen zu arbeiten, in denen es zu einem Kontakt mit diesen Chemikalien kommen kann. Diese Einschränkung endet erst, wenn das Baby nicht mehr

gestillt wird. Im Falle einer Schwangerschaft kommt es daher zu langfristigen Ausfallzeiten und infolgedessen eventuell zu starken Einschränkungen für den Fortschritt der Forschungsarbeiten. Da das beantragte SPP vorrangig Forschungsprojekte mit zwei oder mehreren Partnern aus unterschiedlichen Forschungseinrichtungen befürwortet wird, können sich familienbedingte Ausfallzeiten von Mitarbeitenden ebenfalls stark auf den Zeitplan und die Arbeiten der Projektpartner auswirken. Um derartige Risiken zu reduzieren, werden finanzielle Mittel des Moduls Chancengleichheitsmaßnahmen beantragt. Weitere Mittelverschiebungen und ggf. Projektverzögerungen werden innerhalb des SPPs und in Absprache mit der DFG ausgeglichen.

- [P1] M. Kohl, Shape memory microactuators, Springer book series on Microtechnology and MEMS, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- [P2] M. Kohl, M. Gueltig, V. Pinneker, R. Yin, F. Wendler and B. Krevet, Magnetic Shape Memory Microactuators, *Micromachines* 5 (2014): 1135-1160.
- [P3] J. Barth, B. Krevet and M. Kohl, A bistable shape memory microswitch, *Smart Materials and Structures* 19 (2010): 094004.
- [P4] J. Barth, C. Megnin, and M. Kohl, A bistable shape memory alloy microvalve with magnetostatic latches *Journal of Microelectromechanical Systems* 21 (2012): 76-84.
- [P5] M. Kohl, B. Krevet and E. Just, SMA microgripper system, *Sensors and Actuators A* 97-98 (2002): 646-652.
- [P6] S. Schonhardt, J.G. Korvink, J. Mohr, U. Hollenbach, U. Wallrabe, Optimization of an electromagnetic comb drive actuator, *Sensors and Actuators A* 154 (2009): 212-217
- [P7] K. Kratt, V. Badilita, T. Burger, J.G. Korvink, U. Wallrabe, A fully MEMS compatible process for 3-D high aspect ratio micro coils obtained with an automatic wire bonder, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 20 (2009): 015021.
- [P8] J. Brunne, M.C. Wapler, U. Wallrabe, A fast and robust piezoelectric axicon mirror, *Optics Letters* 39.15 (2014): 4631-4634.
- [P9] M.C. Wapler, C. Weirich, M. Stürmer, U. Wallrabe, Ultra-compact, large-aperture solid state adaptive lens with aspherical correction, *Proc. Transducers 2015, Anchorage, AL, USA, 2015*, pp.399-402.
- [P10] K.V. Poletkin, Z. Lu, U. Wallrabe, V. Badilita, A New Hybrid Micromachined Contactless Suspension with Linear and Angular Positioning and Adjustable Dynamics, *Journal of Microelectromechanical Systems* 24.5 (2015): 1248-1250.
- [P11] E. Lage, C. Kirchhof, V. Hrkac, L. Kienle, R. Jahns, R. Knöchel, E. Quandt, und D. Meyners, Exchange biasing of magnetoelectric composites, *Nature Materials* 11.6 (2012): 523-529.
- [P12] E. Yarar, V. Hrkac, C. Zamponi, A. Piorra, L. Kienle, E. Quandt, Low temperature aluminum nitride thin films for sensory applications, *AIP Advances* 6 (2016): 075115.
- [P13] C. Chluba, W. Ge, R. Lima de Miranda, J. Strobel, L. Kienle, E. Quandt, M. Wuttig, Ultralow-fatigue shape memory alloy films, *Science* 348 (2015): 1004.
- [P14] B. Winzek, S. Schmitz, H. Rumpf, T. Sterzl, R. Hassdorf, S. Thienhaus J. Feydt M. Moske, E. Quandt, Recent developments in shape memory thin film technology, *Materials Science and Engineering A* 378 (2004): 40-46.
- [P15] C. Bechtold, R. Lima de Miranda, C. Chluba, E. Quandt, Fabrication of self-expandable NiTi thin film devices with micro-electrode array for bioelectric sensing, stimulation and ablation, *Biomed Microdevices* 18 (2016): 106.
- [P16] C. May, K. Schmitz, M. Becker, M. Nienhaus, Investigation of Twisted String Actuation with a Programmable Mechanical Load Test Stand“. *Innovative Klein- und Mikroantriebs-technik (IKMT 2013)*, IEEE Xplore, Nürnberg, Germany, September 2013.
- [P17] E. Wagner, M. Lehser, M. Nienhaus, Embedded Multi-Core Systems for the Integration of Multi-Axis Motor-Controllers for Sensorless Electrical Drives, *Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik (IKMT 2015)*, IEEE Xplore, Köln, Germany, September 2015.
- [P18] E. Grasso, D. Merl, M. Nienhaus, A Direct Flux Observer for Implementatin of PMSMs Sensorless Control in Embedded Systems, *Proc. IEEE IECON 2016, Florence, Italy, October 2016*
- [P19] S. Kleen, M. Nienhaus, Impact of the embedding of magnets on a sensorless drive method, *Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik (IKMT 2017)*, IEEE Xplore, Saarbrücken, Germany,

September 2017.

- [P20] N. König, E. Grasso, M. Nienhaus, Robust Electrical and Mechanical Parameter Identification of Low-Power PMSMs, Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik (IKMT 2017), IEEE Xplore, Saarbrücken, Germany, September 2017.
- [PAT1] M. Kohl, T. Takagi, M. Ohtsuka, K. Yamauchi, Actuator for an optical-mechanical scanner and a method of using the actuator; DE 102 136 71; US 7,142,341
- [PAT2] M. Kohl, J. Barth, Bistabiler magnetischer Aktuator aus einer Formgedächtnislegierung, DE 10 2008 027 325
- [PAT3] T. Grund, J. Barth, M. Kohl, Vorrichtung und Verfahren zum selektiven Übertragen einer mikrostrukturierten Komponente, DE 10 2009 017 306.4
- [PAT4] M. Wapler, U. Wallrabe, M. Stürmer, Piezoelektrisches Element, Deutsches Patent 10 2013 210 561.4 (2016)
- [PAT5] Lage, E.; Meyners, D.; Quandt, E.: Magnetostrictive Layer System, EP2538235B1; CN103620435B
- [PAT6] Rumpf, H.; Quandt, E.: Strukturierte Nickel-Titan-Folien, insbesondere für Implantate, DE 102005018731A1 , US020090127226A1
- [PAT7] Schmitt, S.; Winkler, B.; Zimmer, J.; Rührig, M.; Wecker, J.; Quandt, E.: Kraftsensor, Verfahren zur Ermittlung einer auf einem Kraftsensor wirkenden Kraft mittels eines Mehrschichtsystems aus magnetischen Schichten, DE 102005009390B3, US 2006/0251928A1
- [PAT8] Schmitz, F.; Lacher, M.; F.; Nienhaus, M.: "SU-8-Mikrospulen". DE 199 55 975.9, Nationalisiert in Japan, USA, Europa, (1999)
- [PAT9] Kleen, S.; Nienhaus, M.; Stein, R.; Zander, M.: "Kleinst-Elektromotor mit integrierter Motor-spule". PTC/EP/2008/067436, WO 2009/077456 A2, (2008)
- [PAT10] Grasso, E.; Merl. D.; Nienhaus, M.: „Verfahren und Vorrichtung zum Bestimmen einer Läufer-lage eines Läufers einer elektronisch kommutierten elektrischen Maschine“, DE102016117258, (2016)
- [Aba2010] A. Ababneh, U. Schmid, J. Hernando, J.L. Sanchez-Rojas, H. Seidel, Materials Science and Engineering B 172 (2010): 253-258.
- [Bau2017] K. Bauer, Ch. Karch, A. Heilmann, M. Blechschmidt, 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017, AIAA paper (2017): 0323.
- [Bech2013] T. Bechtold, G. Schrag, L. Feng (eds), System-level Modeling of MEMS, Wiley-VCH, Weinheim, 2013.
- [Bel2011] J. Belardi, N. Schorr, O. Prucker, J. Rühle, Adv. Funct. Mater. 21 (2011): 3314-3320.
- [Bel2016] F. Bello, H. Kajimoto, Y. Visell, (Eds.), 10th EuroHaptics London 2016, Proceedings Vol. 9774, Springer, 2016.
- [Ble2016] M. Blechschmidt, K. Bauer, W. Nitsche, 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2016, AIAA paper (2016): 0054.
- [Bol2010] C. Bolzmacher, K. Bauer, U. Schmid, M. Hafez, H. Seidel, Sensors and Actuators A 157.1 (2010): 61-67.
- [Büt2014] S. Büttgenbach, Micromachines 5.4 (2014): 929-942.
- [Cam2017] Cambridge Consultants, T. Winchcomb, S. Massey, P. Beatal, Review of latest developments in the Internet of Things, Date: 07 March 2017, Doc Ref:P2952-R-001 v4.8.
- [Cha2008] V.R. Challa, M.G. Prasad, Y. Shi, F.T. Fisher, Smart Mater. and Struct. 17.1 (2008): 015035.
- [Cui2006] J. Cui et al., Nature Materials 5.4 (2006) : 286 – 290.
- [Dao2011] D.V. Dao, P.H. Pham, S. Sugiyama, Journal of Microelectromechanical Systems 20.1 (2011): 140-149.
- [EC2017] European Commission – Research and Innovation, Horizon Prize on Tactical Display, <http://ec.europa.eu/research/horizonprize/index.cfm?prize=tactiledisplay>, letzter Zugriff: 06.10.2017
- [Ert2011] A. Erturk, D.J. Inman, Journal of Sound and Vibration 330.10 (2011): 2339–2353.
- [Fre2004] M. Freudenreich, U. Mescheder, G. Somogyi, Sensors and Actuators A 114 (2004) 451–459
- [Gru2009] T. Grund, C. Megnin, J. Barth, and M. Kohl, Journal of Microelectronics and Electronic Packaging 6.4 (2009): 219-227.
- [Haj2012] A. Hajati, D. Latev, D. Gardner et al., Applied Physics Letters, 101 (2012): 253101.

- [Hod2013] M. Hodgins, A. York, S. Seelecke, *Smart Materials and Structures* 22 (2013) 094016.
- [Hof1999] M. Hoffmann, P. Kopka, E. Voges, *Sensors & Actuators A78* (1999): 28-35.
- [Hof2001] M. Hoffmann, D. Nüsse, E. Voges, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 11 (2001): 323-328.
- [Hos2010] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, H. Shinoda, *IEEE Transactions on Haptics* 3.3 (2010): 155-156.
- [How1990] R.T. Howe, R.S. Muller, K.J. Gabriel, W.S.N. Trimmer, *IEEE Spectrum* 27.7 (1990): 29-31.
- [Khu2011] B.T. Khuri-Yakub, Ö. Oralka, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 21.5 (2011): 054004-054014.
- [Kin2004] C. King, J.J. Beaman, S.V. Sreenivasan, M. Campbell, *Journal of Mechanical Design* 126 (2004): 1036-1046.
- [Koh2004] M. Kohl, D. Brugger, M. Ohtsuka and T. Takagi, *Sensors and Actuators A114* (2004) 445-450.
- [Koh2007] M. Kohl, D. Brugger and B. Krevet, *Sensors and Actuators A* 135.1 (2007): 92-98.
- [Kud2015] M. Kudryavtsev, E. B. Rudnyi, J. G. Korvink, D. Hohlfeld, T. Bechtold, *Microelectronics Reliability* 55.5 (2015): 747-757.
- [Lai2013] A. Lai, Z.H. Du, C.L. Gan, C.A. Schuh, *Science* 341.6153 (2013): 1505-1508.
- [Lee2008] M. Leester-Schädel, B. Hoxhold, C. Lesche, S. Demming, S. Büttgenbach, *Microsyst Technol.* 14 (2008): 697–704..
- [Leo2015] S. Leopold, D. Pätz, S. Sinzinger, M. Hoffmann, TU Ilmenau, „Das technische Auge – dreidimensionale Abtastung des Objektraums“, *Mikrosystemtechnik-Kongress 2015*.
- [Mar2017] M. Maroufi, A.G. Fowler, S.O.R. Moheimani, *Journal of Microelectromechanical Systems* 26.3 (2017): 469-500.
- [May2013] C. May, K. Schmitz, M. Becker, M. Nienhaus, *Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, Proc. 9th GMM/ETG Symposium (Nürnberg 19-20 September 2013)*, pp. 40-45.
- [May2014] C. May, T. Martini, M. Nienhaus, *Actuator 2014, Proc. 14th International Conference on New Actuators and Drive Systems, (Bremen 23-25 June 2014)*, pp. 277-280.
- [Meg2012] C. Megnin, J. Barth and M. Kohl, *Sensors and Actuators A* 188 (2012): 285-291.
- [Meh2015] H. Mehner, C. Weise, S. Schwebke, S. Hampel, M. Hoffman, *Microelectronic Engineering* 145 (2015): 104–111.
- [mem2017] memetis GmbH, <http://memetis.com/>, letzter Zugriff: 06.10.2017.
- [Och2014] Y. Ochiai, T. Hoshi, J. Rekimoto, *ACM Transactions on Graphics* 33.4 (2014): 85.
- [Ohm2010] C. Ohm, M. Brehmer, R. Zentel *Advanced Materials* 22 (2010): 3366-3387.
- [Pal2013] G. Palli, C. Natale, C. May, C. Melchiorri, T. Würtz, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 18.2 (2013): 664-673.
- [PAL2014] G. Palli et al., *The International Journal of Robotics Research* 33.5 (2014): 799-824
- [Pet1982] K.E. Petersen, *Proc. IEEE*, 70.5 (1982): 420-457.
- [Pol2017] K.V. Poletkin, Z. Lu, U. Wallrabe, J. Korvink, V. Badilita, *International Journal of Mechanical Sciences* 131-132 (2017): 753–766.
- [Pot2012] P.P. Pott, A.G. Carrasco, H.F. Schlaak, *Proc. ACTUATOR 2012, Bremen, Germany* (2012): 189-190.
- [Scha2015] S. Schauer, X. Liu, M. Worgull, U. Lemmer, H. Hölscher, *Optical Materials Express* 5 (2015): 576-584.
- [Scha2017] S. Schauer, M. Worgull, H. Hölscher, *Soft Matter* 13 (2017): 4328-4334.
- [Scho2008] S. Schonhardt, J.G. Korvink, U. Hollenbach, J. Mohr, U. Wallrabe, *Journal of Microelectromechanical Systems* 17.5 (2008): 1164-1171.
- [Schw2017] D. Schwärzle; X. Hou, O. Prucker; J. Rühle, *Advanced Materials* (2017) 1703469.
- [Schl2005] H.F. Schlaak; M. Jungmann; M. Matysek; P. Lotz, *Proc. of SPIE* 5759 (2005): 121-133.
- [Sta2009] S.C. Stanton, C.G. McGehee, B.P. Mann, *Applied Physics Letters* 95.17 (2009): 174103.
- [Sta2013] M. Staab, *Elektrothermisch aktuiertes magnetostatisch bistabiles Mikrorelais für Schaltmatrizen*, TU Darmstadt, 2013, urn:nbn:de:tuda-tuprints-37048.
- [Vit2006] R. Vitushinsky, F. Khelifaoui, S. Schmitz and B. Winzek, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 23 (2006): 113-118.
- [VWB2008] T. Völkel, G. Weber, and U. Baumann, In: K. Miesenberger, J. Klaus, W. Zagler, and A. Karshmer (eds), *Computers Helping People with Special Needs*, vol 5105., 2008, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 835-842.

- [Wal2004] S. Walter, M. Hinrichs, H. Lehr, C. Rein, In: ETG-Fachberichte, 96, ETG-/GMM-Fachtagung Innovative Klein- und Mikroantriebstechnik, 2004, VDE-Verlag, Berlin, pp. 205-209.
- [Wap2013] M.C. Wapler, J. Brunne, U. Wallrabe, Smart Materials and Structures 22 (2013): 102001.
- [Win2004] B. Winzek, S. Schmitz, H. Rumpf, and E. Quandt, Materials Science and Engineering: A 378 (2004): 40-46.
- [Win2016] T. Winterstein, Optimierung der Leistungsfähigkeit elektrothermischer Polymeraktoren aus SU-8 am Beispiel eines haptischen Displays, TU Darmstadt, 2016, urn:nbn:de:tuda-tuprints-57198
- [Wis2009] M. Wischke, M. Masur, P. Woias, Transducers 2009, Denver, CO, USA, 2009, pp. 521-524.
- [Win2014] T. Winterstein, M. Staab, C. Nakic, H.J. Feige, J. Vogel, H.F. Schlaak, Micromachines 5.4 (2014): 1310-1322 .
- [Wu2008] L. Wu, H. Xie, Sensors and Actuators A 145 (2008): 371-379 .
- [Yin2016] R. Yin, F. Wendler, B. Krevet, M. Kohl, Sensors and Actuators A 246 (2016): 48–57.
- [Yole2015] Yole Development, Status of the Microfluidics Industry, Mark. Technol. Rep. 2015.
- [Zar2010] R. Zarnetta, A. Ludwig et al., Advanced Functional Materials 20.12 (2010): 1917-1923 .
- [Zha2003] Zhang, J, Zhang, Z., Lee, Y.C., V.M. Bright, Sensors and Actuators A 103 (2003): 271-283.
- [Zha2016] X. Zhang, L. Zhou, H. Xie, Proc. IEEE MEMS 2016, Shanghai, China, 2016, pp. 71-74.