

Zusammenfassungen der Anträge im SPP 2206/1:

AM 120/10-1, BE 3179/2-1, HO 2284/15-1, WA 1657/10-1

Kick and Catch – kooperative Mikroaktoren für frei bewegliche Plattformen

Kick and Catch - cooperative microactuators for freely moving platforms

Bewegliche Massen sind integrierte Bestandteile von Mikrosystemen und üblicherweise über Biegefedern gelagert. Diese dienen als Gelenke und ersetzen die in der Mikrotechnik fehlenden Kugellager. Dadurch wird der Arbeitsbereich limitiert, und die Aktoren müssen immer die Rückstellkraft der Balken überwinden. Um die Masse in einer ausgelenkten Position zu halten, muss der Aktor also stets aktiv sein oder arretiert werden.

Die heute allgegenwärtigen eingebetteten Systeme erfordern energiesparende Lösungen, was elektrostatische Aktoren, die nur zum Laden kleiner Kapazitäten Energie benötigen, gewährleisten. Magnetische und thermische Aktoren hingegen versagen aufgrund ihres kontinuierlichen Energieverbrauchs. Unser Antrag Kick and Catch adressiert exakt diesen Aspekt. Wir möchten die Verschiebung einer frei beweglichen Masse ermöglichen; sie ist nicht an Biegefedern aufgehängt. Was zählt, ist die finale Position, in der die Masse fixiert werden soll. Um hohe Geschwindigkeit und große Auslenkungen zu gewährleisten, soll die Masse einem plötzlichen Stoß (Kick) ausgesetzt werden und in eine Freiflugphase eintreten. Die Landung in einer definierten Endposition soll kontrolliert erfolgen, in einem vorausberechneten und gut geplanten Catch.

Wir zielen auf zwei grundlegende Szenarien ab: In einem erfolgt eine lineare Bewegung entlang einer Achse senkrecht zum Substrat mit mindestens zwei stabilen Endpositionen, im anderen eine Verkippung, wobei der Winkel zwischen der Achse und dem Substrat mehrere stabile Positionen erlaubt. Im ersten Fall soll der Kick mittels Piezoaktor realisiert werden, im zweiten mittels elektrostatischem Aktor. Das kontrollierte Fangen soll jeweils durch Kombination von Permanent- und Elektromagnet erfolgen. Dabei soll das Kick-Aktorsignal zur Initiierung einer aktiven Steuerung während der Freiflugphase verwendet werden, die die Lagerung ersetzt. Unterstützt durch dynamische Simulation und Flugprognose wird der Regelkreis dann die Catch-Phase einleiten, die eine sanfte Landung ermöglicht und Prolleffekte unterdrückt.

Unser gemeinsamer Antrag adressiert demnach die Hauptforschungsaspekte des DFG Schwerpunktprogramms SPP 2206/1 KOMMMA: Wir arbeiten an kooperativen Mikroaktoren, die für das beabsichtigte Prinzip erforderlich sind. Beide Ansätze ermöglichen Multistabilität, um den Energieverbrauch zu minimieren. Aktorsignale werden für eine geschlossene Regelung in einem Sensormodus verwendet. Vier Forschungsgruppen vereinen ihre Kräfte, um den Herausforderungen der neuen kooperativen Aktorkonzepte Kick and Catch

gerecht zu werden. Zwei der vier Partner, U. Wallrabe und M. Hoffmann, haben einen langjährigen Fokus auf Mikroaktoren. T. Bechtold ist Expertin in multiphysikalischer Simulation unter Anwendung von Modellordnungsreduktion auf große, dynamische elektromechanische Systeme. C. Ament bringt Expertise in Regelungstechnik mit Fokus auf Nanopositionierung ein.

Kick and Catch - cooperative microactuators for freely moving platforms

Movable masses being integrated parts of complex microsystems are typically suspended to cantilevers. The cantilevers serve as bearings to compensate for the lack of ball bearings in microtechnology. All have in common that the operational range is limited and that the actuators which provide the displacement always need to overcome the restoring spring force of the cantilevers. Consequently, if one aims to hold a movable mass in a displaced position, the actuator always needs to be switched on or a locking mechanism is required.

The ubiquitous embedded systems require energy-saving solutions. This is easily fulfilled with electrostatic microactuators that only require energy for charging a small capacitor. However, magnetic or thermal actuators, e.g., continuously consume electrical power. Our proposal Kick and Catch addressed exactly this issue. We want to displace of a freely movable mass without suspending it to cantilevers. What counts is the final position in which the mass shall then be stably fixed. To account for high speed and large displacements the moving mass shall undergo a sudden push, a Kick, and then enter into a free flight phase. The landing in a defined end position shall happen in a controlled way, a foreseen and well planned Catch.

We are aiming for two basic actuation scenarios: One provides a linear displacement along an axis perpendicular to the substrate and at least two stable positions, whereas the other provides a tilt where the angle between the axis and the substrate can be varied in multiple stable positions. In the first case, the Kick shall be realized using a piezo actuator, and in the second case using an electrostatic actuation. The controlled Catch shall be done in both cases magnetically combining permanent and electro magnets. Thereby, the signal of the Kick actuator shall be used to initiate an active control during the flight phase, thus replacing the bearings. Supported by dynamic simulation and flight prediction the control loop will then actuate the Catch phase allowing for smooth landing and suppressing bouncing.

Our joint proposal thus addresses the main research aspects of the DFG Priority Program SPP 2206/1 KOMMMA: We are working on cooperative microactuators that are mandatory for the intended principle. Both approaches provide multistability to minimize the consumed energy. The actuator signals will also be used in a sensing mode to allow for closed-loop control. Four research groups will join forces to tackle the challenges of the new cooperative actuation concepts of Kick and Catch. Two of the four partners, Ulrike Wallrabe and Martin Hoffmann, have a long-term focus on microactuators. Tamara

Bechtold is an expert in multiphysics simulation applying model order reduction to large dynamic electromechanical systems. Finally, Christoph Ament provides the expertise in control theory with a focus on nanopositioning.

AM 120/9-1, HO 2284/14-1

Räumliche Aktorik auf der Basis von wechselwirkenden elektrostatischen Effekten und deren Kontrolle

Spatial arrangement of diverse electrostatic effects, their interaction and control

Aus dem Standes der Technik für elektrostatisch Aktoren ergibt sich, dass das elektrische Feld nach wie vor das vielversprechendste Antriebsprinzip in der Mikrosystemtechnik ist und es viel mehr Ansätze als nur Kamm-Antriebe und digitale Parallel-Platten-Aktoren gibt. Bislang wurden aber zumeist einzelne elektrostatische Effekte, untersucht. Interaktionen wurden nur berücksichtigt, wo dies zwingend notwendig war wie beim Pull-In Effekt.

Gründe hierfür könnten das einfache und zumeist eindimensionale Design für diskrete Effekte, die Bevorzugung von kaskadierten Aktoren für komplexe Antriebssteuerungen, die Komplexität der Wechselwirkungen von elektrischen Feldern im Raum und insbesondere die weitgehend getrennte Forschung im Bereich der „trockenen“ Domäne MEMS und der „nassen“ Domäne Mikrofluidik sein.

Dieses Projekt verfolgt das Ziel verschiedene Antriebseffekte des elektrischen Feldes auf Festkörper und Flüssigkeiten in einem Aktorkonzept zusammenzufassen, das auf einer frei beweglichen Plattform auf einer flüssigen Lagerung beruht. Es adressiert sowohl große Bewegungsbereiche wie auch die präzise Feinjustierung.

Es zielt auf ein besseres Verständnis der Kopplung verschiedener Effekte ab. Dazu sind klassische Platten-Aktoren und flüssige Dielektrika im selben einstellbaren elektrischen Feld angeordnet. Digitale, multistabile wie fein kontrollierbare Effekte sind hier zusammengefasst.

Inhärente Sensoren zur Ortsbestimmung sind in Form der differentiellen Kapazitäten vorhanden, die Aktor-Elektroden können hierzu entsprechend genutzt werden. In der ersten Phase des SPP ist ein Demonstrator zur Kombination von vier Effekten geplant.

Er umfasst eine flüssige Lagerung, die übliche Federn ersetzt und kombiniert „trockene“ und „nasse“ elektrostatische Effekte, inklusive der Erforschung einer Gesamt-Steuerung, die auch die spezifischen Querempfindlichkeiten berücksichtigt. Aus diesem Grund arbeiten hier ein Fachgebiet für Mikrosystemtechnik und für Regelungstechnik zusammen.

In der zweiten Phase ist eine Erweiterung der Freiheitsgrade und die Integration weiterer Aktorik-Effekte geplant.

From a review of the state of the art in electrostatic actuation, it can be concluded, that the electrical field is the most promising actuation in microsystems and there are many more ways to use it for actuation than comb-drives and digital parallel-plate actuators. So far, mostly single electrostatic effects have been investigated, except for unavoidable interactions such as the pull-in effect.

Reasons for this may be the simple and one-dimensional design of a discrete effect, the preferred synthesis of complex motion path from cascaded simple actuators, the complexity of electrical field interactions and resulting cross-sensitivities and the almost separated research in the “dry” domain of MEMS and the “wet” domain of microfluidics.

This project intends to combine different actuation effects of the electrical field on solids and liquids in a single actuator concept based on a freely moving platform with liquid bearing. It addresses long-scale movements as well as the precise micropositioning.

It aims for a deeper understanding of the coupling of different effects as solid capacitors and liquid dielectrics are located in the same varying electrical fields. “Digital” as well as precisely controllable effects are found among electrostatic actuation as well as multi-stable concepts.

Inherent sensing of the actual location by investigating differential capacitor pairs. The actuator electrodes are suitable for this purpose, e.g. by high-frequency, low-voltage sampling of the capacity.

In the first phase, a demonstrator device combining four different effects is planned.

Additionally, it uses liquid bearings replacing a classical spring and combines “dry” and “wet” electrostatic effects, including an overall control concept taking the specific cross-sensitivities into account. For this reason, this project is a cooperation of a MEMS group and a control group.

In the second phase, an extension into further degrees of freedom and the integration of alternative acutation effects is intended.

FA 453/15-1, KO 2953/10-1, WE 4747/5-1

Kopplungseffekte in wieder-programmierbaren Mikro-Materialien

Coupling Effects in Re-Programmable Micro-Matter

Programmierbare Materialien (PM) sind ein neues, im Entstehen begriffenes Forschungsgebiet, das auf selbstfaltendem Origami basiert. Origami beschreibt

eine Vielzahl von Technologien, mit denen ebene Folien durch wiederholtes Falten in dreidimensionale (3D) Strukturen überführt werden können. Dieser Ansatz wird schon erfolgreich in vielen Bereichen der Ingenieurwissenschaften eingesetzt, z. B. für die Montage und in der Robotik. Im Prinzip kann mit diesem Ansatz jede dreidimensionale Form alleine durch Falten entstehen. Die grundlegende Idee ist hierbei, dass sich PM bei Bedarf selbst reversibel in die unterschiedlichsten Formen umwandelt und so eine Vielzahl von Aufgaben erfüllen kann. Das ursprünglich, planare System besteht aus miteinander verbundenen Kacheln, die sich mithilfe von integrierten Biegeaktoren und magnetischen Verriegelungsmechanismen autonom in die vorgegebene Form bringen. Hierdurch können unterschiedlichste 3D Geometrien realisiert werden, die eine Vielzahl von Funktionen erlauben. Aktuelle Demonstratoren verwenden Biegeaktoren aus dünnen Nitinol-Folien, die das System jedoch nur zusammenfalten können, da sie den Einweg-Formgedächtniseffekt verwenden. Das für die Wiederverwendung notwendige Auseinanderfalten in die flache Form muss deshalb noch manuell erfolgen. Dieses Konzept wurde bisher nur auf der makroskopischen Längenskala demonstriert und somit limitiert die bisherigen Technologien die Größe der Kacheln auf mehrere Millimeter.

In diesem Projekt übertragen wir dieses Aktorkonzept auf die Mikrotechnologie indem wir neueste Methoden der integrierten Mikrosystemtechnik, multifunktionale Schichten und gekoppelte Simulationsverfahren kombinieren. Da ein manuelles Auseinanderfalten auf der Mikroskala nicht möglich ist, führen wir kooperative bi-direktionale Aktoren ein, die große Biegewinkel von bis zu $\pm 180^\circ$ ermöglichen. Darüber hinaus werden wir einen multistabilen, magnetischen Mechanismus einführen, der sowohl Verriegelung als auch Entriegelung auf der Mikrometerskala erlaubt. Die Kooperation dieser Komponenten ist erforderlich damit sich PM autonom und reversibel zwischen unterschiedlichsten 3D Formen umwandeln kann. Daher zielt dieses Projekt auf die kontrollierte Kopplung der Aktor-Komponenten in mikro-PM um ein mehrstufiges multistabiles Falten zu erreichen. Dieses neue Konzept von wieder-programmierbaren Mikro-Materialien erlaubt somit sowohl die Bildung und mehrstufige Anpassung seiner 3D Form auf verschiedenen Längenskalen, als auch seine Wiederverwendung durch aktives Entfalten. Um viele Kacheln herzustellen und eine hohe Integrationsdichte zu realisieren, verfolgen wir eine monolithische Herstellungsrouten.

Die Entwicklung geeigneter Methoden und Verfahren zur Herstellung von wieder-programmierbaren Mikro-Materialien erfordert einen interdisziplinären Ansatz. Deshalb kombiniert dieses Projekt die Expertise zu funktionalen Schichten (S. Fähler), Mikrosystemtechnologie (M. Kohl) und Systemsimulationen (F. Wendler).

Programmable matter (PM) is a new emerging concept that is based on self-folding origami. Origami refers to a variety of techniques of transforming planar sheets into three-dimensional (3D) structures by folding, which has been introduced in science and engineering for, e.g., assembly and robotics. In

principle, 2D pattern consisting of various materials can be transferred into any 3D pattern. The underlying idea of PM is to create a programmable material that can be shaped on demand reversibly and in different ways in order to perform multiple tasks. The initial planar system is composed of interconnected sections (tiles) that self-fold into a set of predetermined shapes using embedded actuators and magnetic latching. Thus, multiple 3D shapes with multiple functions can be realized. Current demonstrators use unidirectional actuators, consisting of a thin foil of the one-way shape memory alloy (SMA) Nitinol. Therefore, resetting to the initial planar state has to be performed manually before folding can be repeated. This concept has been demonstrated at the macro scale and the scalability of the current technology approach is limited to the size of tiles of several mm.

Here, we propose to transfer this concept into microtechnology by combining state-of-the-art methods of micromachining, multifunctional materials as well as coupled simulation. As manual resetting will not be possible at the microscale, cooperative bi-directional actuation will be introduced, allowing for large bending angles up to $\pm 180^\circ$. Further challenges are the selective multistable latching and release of many tiles at the micro scale. Cooperation of both mechanisms will be needed to transform from flat shape to various specific 3D shapes and back to the flat shape by autonomous unfolding. Therefore, this project intends to develop a multistage multistable system of SMA and magnetic microactuators. This new concept of re-programmable micro matter will enable formation and multistage adaptation of 3D shape at different length scales as well as reusability by reversible active unfolding. A monolithic fabrication route will be essential to realize many tiles with high integration density.

The development of the methods and tools for re-programmable micro matter requires an interdisciplinary approach. Therefore, this project combines the expertise from functional films (S. Fähler), microsystems (M. Kohl) and system simulation (F. Wendler).

KO 1883/37-1

Zweidimensionales Array kooperativer hybrid levitierter Mikroaktoren (2DAMA)
A 2D array of cooperative hybrid levitation micro-actuators (2DAMA)

In dem Projekt 2DAMA wird ein innovatives und intelligentes Mikroaktorsystem, welches auf einem zweidimensionalen Array von miteinander kooperierenden multistabilen und hybrid levitierten Mikroaktoren basiert, erforscht und entwickelt. Durch die Implementierung multidisziplinärer und innovativer Ansätze, wie multistabiler Mechanismen oder der arraybasierten und kohärent kooperativen Aktuierung, werden neue Möglichkeiten der gezielten Levitation beliebig geformter mikroskopischer Objekte erreicht. Diese können in ihrer Lage und Position lateral wie auch rotatorisch gezielt beeinflusst und innerhalb des gewünschten Verfabereiches des vorgeschlagenen Aktorsystems definiert abgesetzt werden. Die Umsetzung dieser Ansätze wird durch einen neuartigen

hybriden Levitationsaktor, welcher die Basiskomponente darstellt und in das beabsichtigte Aktorsystem integriert wird, realisiert. Dieses System wird eine verbesserte Leistungsfähigkeit durch eine geringe Betriebsstromstärke (weniger als 10 mA) und niedrigen Temperatureintrag (Umgebungstemperatur) aufweisen. Das beantragte Mikroaktorsystem stellt eine Musterlösung für kommende komplexe Aufgabenstellungen hinsichtlich eines erheblich erweiterten Verfabereiches und breitgefächerter Operationsfähigkeiten, höherer Genauigkeit und gleichzeitig schnellerem Aktoransprechen bezüglich des Transports und der Manipulation von mikroskopischen Objekten, einer signifikanten Verringerung der abgegebenen Energie, der Kontaktvermeidung mit schädlichen Oberflächen und einer gewährleisteten langen Lebenszeit dar.

A 2DAMA project aims on investigation and development of an innovative and smart micro-actuation system based on a 2D array of cooperative and multi-stable hybrid levitation micro-actuators. Through implementing multidisciplinary and innovative approaches based on multi-stable mechanisms, array-based and coherent cooperative actuation, new capabilities such as levitation of arbitrary shaped micro-objects, performing their linear and angular positioning and transportation within a desired area in the proposed actuation system are achieved. Implementation of these approaches is executed by means of a novel hybrid levitation actuator as the basic and integrated element into the proposed actuation system, having newly improved performances, which are characterized by a small operation current (less than 10mA) and low operation temperature (it is comparable to the ambient temperature). The proposed micro-actuation system provides a new paradigm of solution for emerging complex tasks, which require: a considerably extended motion range and wider operational capabilities, transportation and manipulation of micro-objects with a higher accuracy and faster time of actuation, a significant reduction of the dissipated energy, preventing a contact with harmful surfaces and the ensured long lifetimes.

KO 2953/9-1, QU 146/25-1, WU 847/3-1

Kooperative Aktorsysteme für Nanomechanik und Nanophotonik

Cooperative Actuator Systems for Nanomechanics and Nanophotonics

Die besonderen Eigenschaften von Dünnschichten aus Formgedächtnislegierungen (FGL), wie z.B. höchste Energiedichten von 107 J/m³ und günstiges Skalierungsverhalten der Aktoreigenschaften, eröffnen eine Basis für die Entwicklung kooperativer und multistabiler Mikroaktorsysteme mit intrinsischer Sensoreigenschaft für die intelligente Kontrolle von Prozessen im Nanometer-Maßstab, insbesondere wenn der relativ hohe Energiebedarf durch Bi/Multistabilität deutlich reduziert werden kann. Bislang basiert die überwiegende Mehrheit an Aktoren zum nanomechanischen / nanophotonischen Schalten und Abstimmen auf der Elektrostatik z.B. durch

Nutzung von Kammaktoren. Heutige Aktorkonzepte haben miteinander gemeinsam, dass sie eine relative große Basisfläche benötigen, die in vielen Fällen $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ übersteigt. Dies resultiert aus der begrenzten Effektgröße aufgrund ihres ungünstigen Skalierungsverhaltens. Diese Grenzen können durch Einführung von Nanoaktoren aus FGL-Dünnschichten überwunden werden. Das hohe Miniaturisierungspotenzial wird z.B. durch die jüngste Demonstration eines ultra-kompakten nano-photonischen Schalters mit einer Basisfläche von nur $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ unterstrichen.

Daher zielt dieser Antrag auf die Entwicklung und die experimentelle sowie simulative Erforschung neuartiger bistabiler und multistabiler FGL-Polymer Mikroaktorsysteme und deren Kombination mit Silizium-Nanotechnologie zum Schalten und Positionieren nanoskalischer Silizium-Bauelemente. Wesentliche Herausforderungen sind die Kontrolle der koordinierten bi- und multistabilen Aktorik mit ultra-hoher Präzision in der Größenordnung von 100 nm, die für das nanophotonische Anwendungsszenario erforderlich ist, die Beherrschung der verschiedenartigen elektro-thermo-mechanischen Kopplungseffekte, die aus den Material-eigenschaften, dem Engineering und Systemgrenzen resultieren und der hohe Rechenaufwand infolge einer Vielzahl von Simulationen, die für die Entwicklung und Charakterisierung erforderlich sind. Eine piezo-elektrische Spannungs-Sensorik wird eingeführt, um die Phasentransformation und dadurch eine Selbstdetektion der relativen Position zu ermöglichen. Eine monolithische Herstellungstechnologie ist erforderlich, um eine hohe Integrationsdichte zu erzielen. Um diese interdisziplinären Herausforderungen zu bewältigen, vereint dieses Projekt komplementäre Kompetenzen zu gekoppelter Simulation (S. Wulfinghoff), thermo-elastischen Materialien (E. Quandt) und Engineering mikro- und nano-skalischer Systeme (M. Kohl).

The unique properties of shape memory alloy (SMA) films, such as highest work densities up to 107 J/m^3 and favorable down-scaling of actuation performance, provide a basis for the development of novel cooperative and multistable microactuator systems with intrinsic sensing capability for the smart control of processes at the nanoscale, especially if the relative high energy consumption can be significantly reduced by bi/multistability. So far, the vast majority of actuators for nanomechanical / nanophotonic switching and tuning is based on electrostatics, using either comb-drive or gap closing actuators. Current actuator concepts have in common that they require rather a large footprint exceeding $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ in many cases, which results from limited effect size due to poor down-scaling. These limitations may be overcome by introducing nanoactuators based on SMA films. The high miniaturization potential is underlined, e.g. by the recent demonstration of an ultra-compact nanophotonic switch having a footprint of only $1 \times 1 \mu\text{m}^2$.

Therefore, this proposal aims at the development and experimental as well as simulation-based investigation of novel cooperative bistable and multistable SMA-polymer microactuator systems and their combination with silicon nanotechnology for switching and tuning of nanometer-scale silicon devices.

Major challenges are the control of coordinated bi- and multistable actuation with ultra-high precision in the order of 100 nm required for the nanophotonic application scenario, mastering the various electro-thermo-mechanical coupling effects resulting from material properties, engineering and system constraints and the significant computational effort due to a high number of simulations being needed for the development and the characterization. Piezoelectric stress sensing will be introduced to monitor phase transformation and thus to sense relative position. A monolithic fabrication technology is required to achieve a high integration density.

In order to address these interdisciplinary challenges, the project combines the complementary expertise of coupled simulation (S. Wulfinghoff), thermo-elastic materials science (E. Quandt) and engineering of micro- and nanoscale systems (M. Kohl).

KU 3410/1-1

Kopplungseffekte in einem mehrstufigen Ensemble aus bistabilen Mikropumpen für hohe positive und niedrige negative Drücke
Coupling effects in a multi stage of bistable micropumps for high positive or low negative pressures

Die Kombination bistabil arbeitender Piezo angetriebener Mikropumpen in einem mehrstufigen Ensemble ermöglicht neue Funktionen und Druckbereiche. In diesem Projekt wird die grundlegende Wechselwirkung zwischen den einzelnen Aktoren untereinander und den Design Regeln untersucht.

Die Hauptziele dabei sind zu studieren

- wie die einzelne Aktoreinheit in der Kaskade arbeitet
- wie das Totvolumen die Performance der gesamten Kaskade beeinflusst
- wie die Ventileigenschaften die Kaskade beeinflussen
- die Wechselwirkung der Aktoreinheiten im mehrstufigen Ensemble zu verstehen

Combining bistable working piezo driven micropumps to a multistage assembly enable new functions and pressure areas. In this project, the basic interaction of the single actuators with each other as well as the design rules, both for the bistable actuators and the interaction, are investigated.

The main objectives are to study how

- the single actuator units work in a cascade
- the dead volume influences the performance of the cascade
- the valve properties influence the cascade
- understand the interaction of the actuator units in the multistage assembly

ME 2093/5-1

Mehrstufiges multistabiles Aktorsystem mit einstellbarem Hub, Reichweite und Kraft basierend auf kooperativen elektrostatischen Aktoren

Multistage Multistable Actuation System with scalable stroke, range and force capability based on cooperative electrostatic actuators (MUST ACT)

Bei sehr kleinen Elektrodenabständen erreichen elektrostatische Aktoren hohe Energiedichten und Kräfte, allerdings mit aufgrund des Pull-in-Effekts kleinen Hüben. Für Sensorikanwendungen (z.B. Drehratensensoren: Anregung der Primärschwingung, bei Beschleunigungssensoren zur Rückkopplung), stellt dies keine Einschränkung dar, da bei diesen quasi massenlosen Aktoren Amplituden von einigen μm und Kräfte von einigen μN ausreichen.

Nach Stand der Wissenschaft sind hingegen elektrostatische Aktoren nicht für größere Hübe (cm) und mit Kräften im Bereich N, also „Makroanforderungen“ geeignet. Stand der Technik sind hier sogenannte inch-worm-Motoren, bei denen meist mittels kooperativ arbeitender Piezoelemente Klemm- und Vorschubaktoren für einen Vorschub über cm bei hohen Kräften sorgen. Allerdings bauen solche Aktoren groß (kleinste Piezo-Chips ca. $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$) und monolithische Mikrofertigung ist nicht möglich.

Projektziel ist, über Kopplung einer Vielzahl kooperativ arbeitender elektrostatischer Aktoren inch-worm-Antriebe zu ermöglichen, der große Kräfte (N), große Stellwege (cm) und Miniaturisierung/Herstellung in klassischer Si-Mikrotechnik vereinen. Dazu ist ein besseres Verständnis der Prinzipien, Begrenzungen und Randbedingungen zur Realisierung von mikrosystemtechnischen Aktorsystemen, die aus mehrstufigen, multistabilen und kooperativen elektrostatischen Aktoren bestehen und deren Hub, Gesamtweg und Kraft über einen großen Bereich eingestellt werden kann, erforderlich. Eine wissenschaftliche Frage ist die mechanische Stabilität der verteilten multistabilen und kooperativen Aktoren und des Gesamtsystems im Hinblick auf Kopplung und den wirkenden nichtlinearen elektrostatischen Kräften. Dabei stellt sich die grundlegende Frage, wie viele kooperative Einzelaktoren zu einem stabilen Gesamtsystem verschaltet werden können und welche Grenzen der Miniaturisierung, der Genauigkeit und der Kontrollierbarkeit es etwa durch Rauheit oder geometrische Schwankungen der hergestellten Elemente gibt. Weiterhin ist systematisch zu untersuchen, wie sich die inhärente Sensorfunktion elektrostatischer Aktoren (Auswertung der Kapazität im ruhenden oder sogar im dynamischen Betrieb) wechselseitig beeinflusst. Ebenfalls zu untersuchen sind Miniaturisier- und Realisierbarkeit mit Standardverfahren der Mikro- und Nanotechnologie (technologische Grenzen), die Grenzen des mechanischen und elektrischen Systemverhaltens eines aus mehrstufigen, multistabilen Mikroaktoren bestehenden Gesamtsystems und ob neben homogenen Systemen (alle Aktoren

elektrostatisch) auch heterogene Systemarchitekturen (z.B. Kombination elektrostatischer und piezoelektrischer Aktoren) möglich sind.

Methodisch werden Simulationsverfahren (FEM, Simulink), Mikro- und Nanofertigung (zur Realisierung geeigneter Teststrukturen) und hochauflösende Charakterisierungsverfahren und diesbezüglich vorhandene Erfahrungen und Einrichtungen genutzt.

At very small distances between the electrodes electrostatic actuators provide high energy density and forces. However, at these conditions actuation range is very limited due to pull-in. For sensor applications (gyros: actuation of primary oscillation, accelerometers: force feedback) these limitations are not really important as here only very low actuation ranges (μm) and very low forces (μN) are needed for the almost massless systems. However, as state of the art, electrostatic actuation cannot be used for large range and forces needed for „macro“ applications.

State of the art are inch-worm-motors which provide both, large stroke and force, by cooperative function of two clamping actuators with a “moving” actuator. However, these actuator systems are relatively large (smallest multilayer chip ca. $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$) and cannot be fabricated with monolithical microfabrication.

The motivation of this project is to investigate the scientific fundamentals for the realization of electrostatically driven inch-worm like actuator systems based on a large amount of cooperative electrostatic actuators which are miniaturized, can be fabricated by standard Si-technology and which provide both, large stroke (cm) and large forces (N). For that final vision a better understanding of principles, limitations and boundary conditions are needed for microsystem based actuator systems which are built from a huge amount of miniaturized, multistage, multistable and cooperative electrostatic actuators and which provide scalable step size, total range and forces which all can be scaled over several orders of magnitude. A specific scientific question is the influence of non-linear electrostatic force on mechanical stability of each single, distributed multistable and cooperative sub-actuator and of the total actuator system by coupling. Basic questions here are how many of these cooperative and cascaded single actuators can be integrated for a still stable total system and what are the limits for miniaturization, precision and controllability (e.g. caused by roughness and geometrical deviation of fabricated elements within all the actuators). Additionally, a systematic investigation of limitation and cross-coupling for the inherent capacitive sensing provided by each electrostatic actuator (both, in idle and active state) is needed. Further, understanding of miniaturization and producibility using standard Si-based micro- and nanotechnological processes and of the limits of mechanical and electrical system behavior is needed. Besides homogenous integration concepts (only

electrostatic actuators), also heterogeneous systems (e.g. combining electrostatic and piezoelectric actuation) will be investigated which needs a general and parametric system description and fundamental design rules for such a system, especially considering stability.

As methods, FEM- and Simulink simulation, micro- und nanotechnology and high resolution characterization techniques will be used.

RI 3030/2-1, SCHU 1609/7-1, SE 704/9-1

DECMAS – Dielektrische Elastomer-Membranen für kooperative Mikro-Aktor/Sensor-Konzepte

DECMAS - Dielectric Elastomer Membranes for Cooperative Micro-Actuator/Sensor Concepts

Das Ziel dieses Antrags ist die Entwicklung eines neuartigen, hoch-flexiblen Multisegment-Aktorsystems für große Hübe, welches aus mehreren Schichten dielektrischer Elastomer-(DE) Arrays und multistabilen Formgedächtnispolymeren (SMP) besteht. Neuartige Modellierungs- und Entwicklungstools werden entwickelt, welche sowohl die starke elektromagnetische Kopplung zwischen benachbarten Segmenten als auch die inhärenten Self-Sensing Fähigkeiten abbilden. Zum einen ermöglichen diese Tools eine systematische, anwendungsbasierte Auslegung, zum anderen dienen sie als Basis für sensorlose, verteilte Regelungsstrategien für eine gleichzeitige Aktuierung, welche im Rahmen der nächsten Phase des SPP entwickelt werden soll. Das Design von multistabilen Vorspannungselementen für SMP Folienschichten sind ein Ergebnis dieser Tools, als auch eine anwendungsorientierte Elektrodengeometrie der DE-Segmente. Die SMP-Schichten werden in einer geeigneten Form hergestellt, woraus eine energieeffiziente Aktuierung mit hohem Hub resultiert. Die Elektrodensegmente werden durch ein neuartiges Sputter-Verfahren aufgebracht, welches im Rahmen des Projektes entwickelt wird. Hierdurch wird ein hoher Hub und eine hohe Nachgiebigkeit ermöglicht, bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung einer hohen Leitfähigkeit. Die Arbeit wird in drei Unterprojekte aufgeteilt, welche parallel von drei Gruppen bearbeitet werden. Zwei dieser Gruppen gehören der Fakultät Systems Engineering und Materialwissenschaften der Universität des Saarlandes an, während die dritte Gruppe an der Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes (htw saar) ansässig ist. Die erste Gruppe (Rizzello) fokussiert sich auf die Entwicklung von Microscale-Modellen, um ein systematisches Design und Self-Sensing Strategien für Arrays miteinander agierender DE-Membranen zu ermöglichen. Zusätzlich werden kooperative Regelungsstrategien für zukünftige Projektphasen erarbeitet. Parallel hierzu entwickelt die zweite Gruppe (Seelecke) ein neues Auslegungskonzept und Strategien zur Miniaturisierung multistabiler verteilter Aktoren, als auch integrierte Elektronik zur Ansteuerung und Sensorik. Die dritte Gruppe

(Schultes) beschäftigt sich mit der Materialauswahl und Herstellung dehnbare, mikrostrukturierter Elektroden, welche für die lokale Aktuierung der segmentierten DE-Membranen notwendig sind. Die Expertise der drei Gruppen ist dahingehend aufeinander abgestimmt, dass verschiedene Aspekte der DE-Technologie abgedeckt werden, welche für das Erreichen des Ziels kooperativer Aktorsysteme notwendig sind. Hierdurch wird der fachübergreifende Ansatz, welcher für den Erfolg einer Konzeptentwicklung erforderlich ist, dargestellt. Zudem stellt die gemeinsame Lage in Saarbrücken eine enge, synergetische Zusammenarbeit während der gesamten Laufzeit des Projektes sicher.

The objective of this proposal is the development of a novel highly flexible, large-stroke multi-segment micro-actuator system based on layers of dielectric elastomer (DE) arrays and multi-stable shape memory polymers (SMP). Novel modeling and design tools accounting for the strong electromechanical coupling between cooperating segments as well as for inherent self-sensing capabilities of individual actuator segments will be developed. These tools will enable a systematic, application-oriented design on the one hand, while also serving as a basis for sensorless distributed control methods for cooperative actuation to be developed in a future phase of the SPP. The design of novel multi-stable bias mechanisms from SMP film layers will be a result from the tools as well as an application-oriented electrode geometry of the DE segments. The multi-stable bias will be manufactured by appropriately shape setting the SMPs, resulting in energy-efficient large-stroke actuation. The electrode patterns will be applied through novel sputtering techniques which will be developed during the project, enabling large strokes and high compliance while maintaining high electrical conductivity. The work will be organized into three projects which will be conducted in parallel by three groups, two of which from Systems Engineering/Material Science & Engineering at Saarland University, and one of which from Saarland University of Applied Sciences (htw saar). The first group (Rizzello) will focus on developing micro-scale models to allow for systematic design and self-sensing strategies for arrays of interacting DE membrane actuators, and enable cooperative control design in a future stage. At the same time, the second group (Seelecke) will develop new design concepts and miniaturization strategies for multi-stable distributed actuators, as well as integrated driving/sensing electronics. Finally, the third group (Schultes) will address aspects related to material and design of compliant micro-structured electrodes necessary for localized activation of segmented DE membranes. The complementary expertise of the three groups will cover different aspects of DE technology which are required for the achievement of the target cooperative actuator system, ensuring the multidisciplinary approach needed for a successful concept development. In addition, the common location in Saarbrücken will ensure a close and synergistic collaboration for the entire project duration.

RU 489/38-1

Push, push, push - Kooperative Aktuatoren und Aktuatorfelder über Direktschreibprozesse

Push, Push, Push – Cooperative Actuators and Actuators Fields by Direct Writing Pro-cesses

Die Zwei-Photonen-Vernetzung (2PC) auf Basis von C,H-Insertionsreaktionen ermöglicht die Erzeugung von Mikroaktuatoren aus magnetischen Verbundwerkstoffen durch einen maskenlosen Direktschreibeprozess. Dazu werden Copolymere eingesetzt, bei denen 2-Photonen-Chromophore, wie beispielsweise entsprechend substituierte Anthrachinongruppen, eingebaut und mit Hilfe von 2-Photonen-Verfahren vernetzt werden. Dieser Vernetzungsprozess findet im glasartigen Zustand der Polymeren statt. Nach Abschluss des Schreibvorgangs werden alle unvernetzten Polymermoleküle ausgewaschen und die Mikrostrukturen entwickelt. Werden Nanopartikel vor der Abscheidung der Schicht in die Präpolymere eingemischt, können dreidimensionale mikrostrukturierte Nanokomposite in einem einstufigen Prozess direkt gewonnen werden. So können mit Hilfe dieses maskenlosen Schreibprozesses freitragende magnetisch aktiverbare Mikrostrukturen in nahezu jeder Form dreidimensional geschrieben werden. In dem vorgeschlagenen Projekt werden kooperative magnetisch aktiverbare Strukturen wie z.B. Flimmerflächen für Mikromischer oder Mikropumpen oder Aktuatorfelder erzeugt, die metachronale Wellen erzeugen. Durch Variation der Strukturen können Aktuatorfelder mit definierten Eigenschaften oder Aktuatoren, die kooperativ agieren können, erzeugt werden. Größere Strukturen können mit den gleichen Polymeren, aber durch ein herkömmliches photochemisches Verfahren und/oder 3D-Druck erzeugt werden.

Darüber hinaus wird untersucht, inwieweit Mikroaktuatoren durch das Schreiben von Netzwerkstrukturen in Multilagern erzeugt werden können, in denen die Aktuatoren auf unterschiedliche Reize reagieren. Dazu werden aus verschiedenen Materialien mehrschichtige Systeme erzeugt und nach der Trocknung im Zwei-Photonen-Verfahren glasartig vernetzt, so dass die einzelnen Strukturkomponenten kovalent miteinander verbunden sind. Auf diese Weise entstehen Aktuatoren, bei denen Teile der Strukturen entweder allmählich beeinflusst oder durch einen äußeren Reiz, zum Beispiel Licht oder Feuchtigkeit, ein- und ausgeschaltet werden können. So können Mikroaktuatoren erzeugt werden, die eine intrinsische Abtastung und eine autonome Reaktion auf Veränderungen in der Umgebung ermöglichen. Werden diese multireaktiven Aktuatoren geschickt kombiniert, sollte ein mehrstufiges Aktuatorensystem erreichbar sein, bei dem die jeweilige Stufe durch einen externen Reiz erreicht wird. Andererseits könnten bei Blick auf Aktuatorfelder die einzelnen Teile der Cilienfelder durch den äußeren Reiz ein- und ausgeschaltet werden, um neuartige kooperative Phänomene zu untersuchen. Im Rahmen des geplanten Projekts wird auch untersucht, wie mit der neu entwickelten Methode bi- und multistabile Strukturen erzeugt werden können.

Für bi-stabile Strukturen müssen Stellglieder so konzipiert sein, dass das System durch einen einfachen "Snap Through"-Mechanismus von einem stabilen Zustand in einen anderen übergehen kann oder andere Instabilitäten aufweist.

Two-photon crosslinking (2PC) based on C,H insertion reactions allows the generation of microactuators from magnetic composites by a maskless direct writing process. To this copolymers are employed in which 2-photon chromophores such as suitably substituted anthraquinone groups are incorporated and which are cross-linked with the aid of 2-photon processes. This cross-linking process takes place in the glass-like state of the polymers. After completion of the writing process, all non-crosslinked polymer molecules are washed out to develop the microstructures. If nanoparticles have been mixed into the prepolymers before the deposition of the layer, three-dimensional microstructured nanocomposites can be obtained directly in a one-step process. Thus, with the help of such a maskless writing process, magnetically actuatable microstructures in almost any form can be written three-dimensionally which are self-supporting. In the proposed project, cooperative magnetically actuatable structures such as ciliated surfaces for micromixers or micropumps or actuator fields which show metachronal waves will be generated. By variation of the written structures, actuator fields with designed properties or actuators, which can act cooperatively can be generated. Larger structures can be generated by molding with the same polymers, but by a conventional photochemical process and/or 3D printing.

Furthermore, it will be investigated to what extent microactuators can be generated by writing network structures in multilayers in which the actuators react to different stimuli. For this purpose multilayered systems are generated from different materials and after drying they are cross-linked in a glass-like state by means of the two-photon process, so that the individual structural components are covalently linked to each other. In this way, actuators are obtained in which parts of the structures can be influenced either gradually or switched on/off by an external stimulus, for example light or moisture. Thus, microactuators can be generated that allow intrinsic sensing and an autonomous response to changes in the environment. If these multi-responsive actuators are skillfully combined, a multi-stage actuator system should be achievable in which the respective stage is reached by an external stimulus. On the other hand, looking at actuator fields the individual parts of the cilia fields could be switched on and off by the external stimulus, so that novel cooperative phenomena can be investigated.

The proposed project will also investigate how bi- and multistable structures can be generated using the newly developed method. For bi-stable structures, actuators have to be designed where the system can be switched from one stable state to another by a simple "snap through" mechanism or showing other buckling instabilities.

SCHL 532/20-1

EASY-BRAILLE – Elektrothermisches Aktorsystem für bistabile hybride Braille-Flächendisplays

EASY-BRAILLE - Electrothermal Actuator System for bistable hybrid Braille area displays

Die Miniaturisierung des Computers hat es dem Menschen ermöglicht, zu jeder Zeit auf sehr viele Informationen zuzugreifen und diese zu nutzen. Fast 285 Millionen Menschen weltweit sind aufgrund von Störungen des visuellen Sinneskanals von dieser Entwicklung weitgehend ausgeschlossen. Blinde und sehbehinderte Menschen nutzen zum Lesen von Texten in digitalen Medien Braille-Zeilen, die mit Computer-Tastaturen verbunden oder darin integriert werden können. Komplexere Informationen, wie z.B. Grafikelemente oder Tabellen, können bisher nicht vollständig dargestellt werden. Somit besteht ein Bedarf für graphikfähige großflächige taktile Systeme im Raster der Braille-Schrift, die eine kompakte und flache Bauweise aufweisen und mit geringer elektrischer Energie betrieben werden können.

In diesem Projekt soll ein völlig neuartiges Aktorkonzept erforscht werden. Das Flächendisplay arbeitet dabei bistabil. In einer großen Displayfläche werden horizontal wirkende in-plane Aktoren integriert, die während einer Programmierphase für die zu liftenden taktilen Bildpunkte einen in-plane Aktor als Spacer zwischen Pin und Hubaktor einfügen. Die Programmierung erfolgt während der out-of-plane Aktor in abgesenkter Position ist. Nach der Programmierung wird der out-of-plane Aktor inaktiv, so dass die Rückstellfeder die Pins liftet. In einer oberen Antriebslage sind elektrothermische in-plane-Aktoren in zwei Schichten platziert. In der zweiten (unteren) Antriebslage werden federnd aufgehängte Tauchspulantriebe angeordnet, die eine vertikale Bewegung der Hubstifte ermöglichen. Da die Miniaturisierbarkeit von Tauchspulantrieben technologisch begrenzt ist, ist vorgesehen mehrere Hubstifte (z.B. 16 Pins) gleichzeitig mit einem Hubantrieb zu heben und zu senken. In diesem Projekt sind die Potentiale und Grenzen von zwei verschiedenen kooperierenden Aktorsystemen mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung zu erforschen.

The miniaturisation of the computer has made it possible for people to gain access to a very large amount of data at any time, and to use these data. However, almost 285 million people worldwide are largely unable to benefit from this development due to impairment of their vision, with 39 million being fully blind while 246 million have severely restricted vision. More complex data, such as graphics or tables, so far cannot be fully reproduced. Thus there is a need for large-area tactile systems which are able to translate graphics into the grid of the Braille code, and which have a flat, compact construction and require low electric power to operate.

The aim of this project is to research a completely new design for a Braille area display. The Braille display drives work in a bistable mode. Integrated into a large Braille display area are horizontally active in-plane actuators, which, for the taxel to be lifted, insert an in-plane actuator as a spacer between the Braille pin and a lifting actuator during a programming phase. The programming is done while the out-of-plane actuator is in a lowered position. After the programming, the out-of-plane actuator becomes inactive, so that the retracting spring lifts the pins. In an upper actuator configuration electrothermal in-plane actuators are placed in two layers. In a second (lower) actuator layer flexibly mounted plunger coil actuators are arranged which allow a vertical movement of the lifting pins. Because the miniaturisation of plunger coil actuators is limited for technical reasons, it is planned for one plunger coil actuator to lift and lower several lifting pins (e.g. 16 pins) simultaneously. In this project the potentials and limits of two different cooperating actuator systems with diverse spatial resolution will be investigated.

SE 1801/4-1, STA 1195/6-1

Schaltbare, bistabile Mikroaktuatorssysteme aus stimuli-responsiven Polymeren
Switchable, bistable microactuator systems based on stimuli-responsive polymers

Stimuli-responsive Hydrogele sind hochinteressante Materialien für Mikroaktuatorensysteme, da sie für Zellanwendungen und Mikrofluidiken sehr interessante Eigenschaften aufweisen. Gegenwärtige hydrogelbasierte Mikroaktuatoren sind jedoch sehr einfach und Bistabilität ist in diesem Kontext bislang weitgehend unerforscht. Aus diesem Grund sind auch Anwendungen solcher Systeme noch nicht ausgereift.

Wir schlagen hier eine neue Strategie vor, um lichtschtbare, bistabile Mikroaktuatorssysteme, die auf stimuli-sensitiven Polymeren basieren, zu entwickeln. Die Reaktion auf einen spezifischen Stimulus (Hitze) kann mit molekularen Schaltern variiert und angepasst werden. Das Mikroaktuatorssystem wird aus einem thermoresponsiven Polymer hergestellt, das sich in einem geschwollenen, hydrierten Zustand unterhalb der unteren kritischen Lösungstemperatur und in einer zusammengeschrumpften Phase bei höheren Temperaturen befindet. In unserem ersten, konzeptionellen Ansatz wird die Bistabilität durch eine Änderung der unteren kritischen Lösungstemperatur durch eingebrachte Photoschalter erreicht, und das System bei einer definierten Arbeitstemperatur betrieben. Unser zweiter Ansatz ist dynamischer Natur, da wir die lokale Temperatur und zusätzlich die untere kritische Lösungstemperatur durch Schalten mit Licht modulieren werden. Wir werden auch unterschiedliche Möglichkeiten des Heizens untersuchen. Dazu

gehören Jouleheizen, magnetisches Heizen und optisches Heizen. Die Verwendung von ausschließlich thermoresponsiven Hydrogelen stellt derzeit einen Nachteil dar, da Kreuzreaktion zwischen individuellen Mikroaktuatoren auf Grund von Wärmegradienten erwartet werden können. Wir gehen davon aus, dass Licht einen deutlich besser kontrollierbaren Stimulus darstellt, da Licht mit hoher Ortsauflösung in das Mikroaktuatorssystem eingebracht werden kann. Dies sollte Kreuzreaktionen zwischen einzelnen Mikroaktuatoren reduzieren und somit die Funktionalität des gesamten Mikroaktuatorsystems verbessern.

Das finale Mikroaktuatorssystem wird aus einem Feld aus Mikroaktuatoren mit unterschiedlicher Form und Gestalt bestehen. Wir werden untersuchen, inwieweit unser Mikroaktuatorssystem für Anwendungen im Bereich der Mikrofluidik und Zellsortierung geeignet ist. Ein signifikanter Nachteil von aktuellen mikrofluidischen Systemen und Zellsortiersystemen ist, dass ihre Strukturen bedingt durch die Herstellungsprozesse vordefiniert sind. Obwohl Dynamik durch Mikroventile oder externe Steuerungssysteme hinzugefügt werden kann, ist die Flexibilität der Systeme limitiert. Unser dynamisches Mikroaktuatorssystem wird stattdessen auf schaltbaren, bistabilen Mikroaktuatorssystemen basieren. Dieses soll dazu verwendet werden, um Mikrofluidiken und Zellsortiersysteme durch das kooperative Zusammenwirken einzelner Mikroaktuatoren in Systemen dynamisch zu gestalten.

Stimuli-responsive hydrogels are highly interesting materials for generating microactuator systems, as they offer interesting properties for manipulating cells and microfluidic devices. Current hydrogel based microactuators, however, are very simple and the issue of bistability in their function is largely unexploited; therefore applications have not quite matured yet.

We here propose a novel strategy to achieve light switchable, bistable microactuator systems using stimuli-responsive polymers whose response to a specific stimulus (heat) can be modulated by molecular switches. The microactuator systems will be made of thermoresponsive polymers that is in a swollen, hydrated phase below the lower critical solution temperature, and in a shrunken phase at higher temperatures. In our first conceptual approach, bistability will be introduced by changing the lower critical solution temperature through introducing photoswitches; the system will then operate at one work temperature. Our second approach is dynamic, because we will change the local temperature; but in addition, we will also modulate the lower critical solvent temperature (LCST) by switching the hydrogel with light. We will investigate different types of heating stimuli, including Joule heating, magnetic heating and optical heating. A current disadvantage of using merely thermally responsive hydrogels to control the microactuator system is that cross-talks between individual microactuators can be expected through heat gradients. We hypothesize that light might be a much better controllable stimulus as it can be

brought into microsystems with high spatial precision, reducing the cross-talk between the individual microactuators and thus increasing the functionality of the whole microactuator system.

The final microactuator system will consist of an array of microactuators in different shapes and configurations. As applications, we will explore their suitability in microfluidics and cell sorting devices. A significant disadvantage of state-of-the-art microfluidic and cell sorting devices is that their properties are pre-defined during their fabrication. Although some dynamics can be added by microvalves or external steering forces, the flexibility of the devices is still limited. Our dynamic microactuator system will instead be based on switchable, bistable microactuator systems that will add dynamic flexibility into microfluidic and cell sorting devices by the cooperative action of individual microactuators.