

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 100 (2009)
Heft: 11

Artikel: Die Mikrowelt entdecken
Autor: Nagy, Zoltán / Beyeler, Felix
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856427>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Mikrowelt entdecken

Die Arbeit mit Mikroobjekten

Die Handhabung von mikroskopisch kleinen Objekten findet wichtige Anwendung im Zusammenbau von extrem kleinen elektronischen und mechanischen Baugruppen, in der Materialforschung sowie in der biologischen und biomedizinischen Forschung. Wie auch im Gebiet der konventionellen Robotik beschäftigt sich die Mikrorobotik mit dem Aufnehmen, Positionieren und Absetzen von Objekten sowie dem Zusammenbau von verschiedenen Komponenten. Ebenso wichtig ist die Fähigkeit, die Umgebung mittels Sensoren, wie zum Beispiel Kameras oder Berührungssensoren, wahrnehmen zu können. Der Roboter soll in der Lage sein, auf intelligente Weise eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen.

Das Forschungsgebiet der Mikrorobotik beziehungsweise Nanorobotik steckt noch in den Kinderschuhen. Die Anforderung, mit Mikroobjekten arbeiten zu können, bringt eine Vielzahl von technischen Herausforderungen mit sich. Das Aufnehmen und Ablegen dieser Objekte benötigt beispielsweise

Zoltán Nagy, Felix Beyeler

einen Greifer mit Greiferarmen, welche in ihrer Grösse denen der Mikroobjekte entsprechen. Das Öffnen und Schliessen des Greifers muss bezüglich Fahrweg und Auflösung ebenfalls mit den Grössenverhältnissen übereinstimmen. Des Weiteren ist für einige Anwendungen in der Nanorobotik eine Positioniergenauigkeit von Nanometern (Millionstelmillimeter) erforderlich [1].

An der ETH Zürich forscht das Institut für Robotik und Intelligente Systeme (IRIS) seit einigen Jahren an Werkzeugen für die Erforschung und Handhabung von Objekten in der Mikrowelt. Ziel der Forschung ist es, die passenden Werkzeuge für den nächsten Miniaturisierungsschritt bereitstellen zu können. Die konkreten Anwendungen der Forschung sind breit gefächert. Der kontinuierliche Trend, elektronische Systeme (Handys, Laptops, Digitalkameras) weiter zu verkleinern und gleichzeitig zusätzliche Funktionen zu integrieren, stellt enorme Anforderungen an neuartige Mikrorobotiksysteme. Die biologische Forschung beschäftigt sich ebenfalls mit mikroskopisch kleinen Objekten wie

einzelnen Zellen, Zellkomponenten, Proteinen usw. Die Mikrorobotik hilft bei der Handhabung der Zellen sowie bei Aufgaben wie der Injektion von Material in eine Zelle. Als besonders nützliche Werkzeuge haben sich Mikrokraftsensoren und Mikrogreifer herausgestellt. Diese wurden durch die ETH-Spin-off-Firma FemtoTools GmbH zum Produkt weiterentwickelt und vermarktet.

Robotik auf Siliziumbasis

Mit konventionellen Fertigungsmethoden wie z.B. Fräsen, Bohren und Schleifen lassen sich die Mikrowerkzeuge nicht herstellen, da die Strukturen zu klein sind. Auch mit Methoden wie Laserschneiden oder Elektroerosion stösst man schnell an Grenzen. Einen Ausweg bietet die MEMS-Technologie. MEMS ist die Abkürzung für «mikro-elektromechanische Systeme» und bezeichnet Systeme, deren Herstellverfahren auf Prozessen aus der Halbleiterindustrie basieren. Als Basis dienen kristalline Silizium-Wafer. Auf diese wird die Geometrie der Mikrostrukturen mittels Fotolithografie übertragen. Durch eine Kombination aus Aufdampfen dünner Metallschichten und Ätzen von Silizium entstehen im Reinraum die gewünschten Strukturen (Bild 1a). Diese Prozesse erlauben die parallele Herstellung von über 100 Kraftsensor- oder Mikrogreiferchips auf einem einzelnen 100-mm-Wafer (Bild 1b). Kristallines Silizium ist elastisch und härter als Stahl. Aus diesem Grund ver-

fügen die so hergestellten Strukturen trotz ihrer geringen Grösse über hervorragende mechanische Eigenschaften.

Mikrokraftmessung

Kräfte spielen bei der Erforschung und Handhabung von Mikrosystemen eine entscheidende Rolle. Mikrorobotikprozesse werden normalerweise unter Kontrolle eines Mikroskops oder im Falle der Nanorobotik eines Rasterelektronenmikroskops (REM) durchgeführt. Diese optische Überwachung ergibt allerdings keine direkte Information über die Kräfte, die während der Prozesse erzeugt werden. Taktile Messungen und Kraftmessungen ermöglichen eine weitaus robustere Automatisierung und geben Informationen darüber, ob ein Mikroobjekt erfolgreich aufgenommen oder abgelegt wurde. Es kann auch vermieden werden, dass empfindliche Mikroobjekte wie biologische Zellen beschädigt werden.

Die Kräfte, welche in der Mikrorobotik eine Rolle spielen, bewegen sich im Bereich

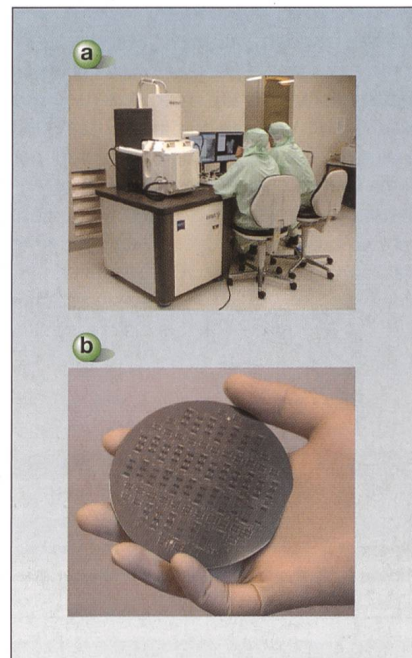


Bild 1 Herstellverfahren für MEMS basieren auf Prozessen der Halbleiterindustrie.

1a: Die Mikrowerkzeuge werden im Reinraum hergestellt.

1b: Auf einem 100-mm-Wafer finden über 100 Kraftsensoren Platz.

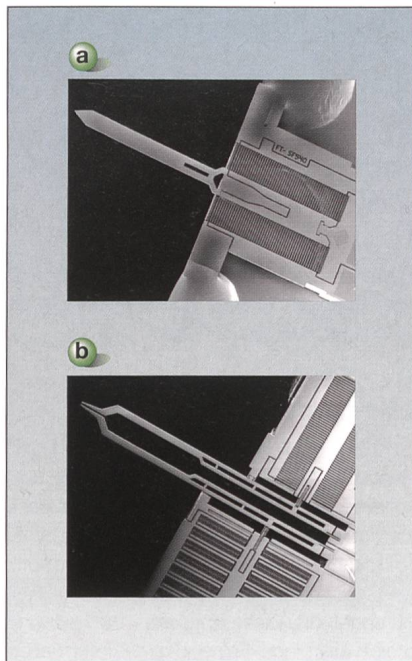


Bild 2 Rasterelektronenaufnahme eines Mikrokrachtsensors (Bild 2a) und eines Mikrogreifers (Bild 2b).

Nanonewton (10^{-9} N) bis Millinewton (10^{-3} N). Gravitationskräfte können aufgrund der verschwindend kleinen Masse oft vernachlässigt werden. Wichtiger sind sogenannte Oberflächenkräfte wie elektrostatische Kräfte, Oberflächenspannung oder Van-der-Waals-Kräfte.

Um die Kräfte der Mikrowelt zu verstehen und robustere Mikrorobotiksysteme zu entwickeln, wurden kapazitive Mikrokrachtsensoren entwickelt. Anders als konventionelle Krachtsensoren, die auf einer Änderung des elektrischen Widerstands infolge Dehnung basieren, werden mit den Sensoren der Firma FemtoTools Kräfte mithilfe einer Änderung der elektrischen Kapazität gemessen. Er besteht aus der Messspitze, einer elastisch verformbaren Federstruktur und einer grossen Anzahl Kondensatorplatten (Bild 2a). Wird eine Kraft auf die Messspitze aufgebracht, entsteht eine kleine Verschie-

bung in der Federstruktur. Diese Verschiebung wird mithilfe von Kondensatorplatten als Änderung der elektrischen Kapazität gemessen. Ein Mikrochip wandelt die Kapazitätsänderung in eine analoge Spannung (0–5 V) proportional zur Kraft um. Mit dieser kapazitiven Messmethode sind Messungen mit extrem hoher Empfindlichkeit möglich (vgl. Tabelle I). Während konventionelle Krachtsensoren eine maximale Auflösung von etwa 1 mN erreichen, ermöglicht das kapazitive Messprinzip die Messung deutlich kleinerer Kräfte mit Auflösungen von unter 1 μ N.

Mikrogreifer

Das Funktionsprinzip der kapazitiven Krachtmessung lässt sich umkehren, indem eine elektrische Spannung (0–200 V) an Kondensatorplatten angelegt wird, um eine Verschiebung zu erzeugen. Dieser elektrostatische Antrieb ist das Grundprinzip des Mikrogreifers, der in Bild 2b dargestellt ist. In diesem sind elektrostatische Aktuation und kapazitive Messung kombiniert: Der linke Arm lässt sich aktuierten, der rechte Arm hingegen wirkt wie ein Sensor, d.h., er wird ausgelenkt, sobald ein Objekt gegriffen wurde (vgl. Tabelle II). So lässt sich in einer Anwendung automatisch feststellen, ob und wie stark ein Objekt gegriffen wurde.

Automatisierte Komplettsysteme

Typischerweise werden Greifer und Sensoren mit Positioniersystemen kombiniert und agieren dabei als Endeffektoren. Die oft mehrachsigen Positionierer werden mittels DC-Elektromotoren, Schrittmotoren oder piezoelektrisch angetrieben. Letztere erlauben Bewegungsaufösungen im Subnanometerbereich, auch mit integriertem Positionssensor. Alle Komponenten eines solchen Systems sind bequem über einen PC steuerbar und ermöglichen somit mikrorobotische Regelsysteme, wie zum Beispiel automatisierte Weg-Kraft-Messungen für die Materialforschung oder hochpräzise Mikromontage-Aufgaben.

Sensor	Messbereich	Empfindlichkeit	Auflösung bei 30 Hz
FT-S270	$\pm 2000 \mu$ N	1000 μ N/V	0,40 μ N
FT-S540	$\pm 160 \mu$ N	80 μ N/V	0,05 μ N

Tabelle I Typische Kennzahlen der Mikrokrachtsensoren.

Greifer	Objektgrösse	Antriebsspannung	Integrierte Krachtmessung
FT-G30	0– 30 μ m	0–110 V	Ja
FT-G60	0– 60 μ m	0–150 V	Nein
FT-G100	10–100 μ m	0–200 V	Ja

Tabelle II Typische Kennzahlen der Mikrogreifer.

Anwendungsbeispiele

Montage von Mikrobaugruppen (Institut für Robotik, ETH Zürich)

Typische Herstellprozesse in der Halbleiterindustrie erlauben den Aufbau von Strukturen bestehend aus mehreren dünnen Schichten. Die Herstellung von komplexen 3-dimensionalen Strukturen stellt jedoch eine Herausforderung dar. Mithilfe von Mikrogreifern lassen sich verschiedene Baugruppen und Bauteile mikrometergenau zusammensetzen (Bild 3). Diese Mikromontage erlaubt auch die Kombination von Halbleiterchips mit Strukturen aus Materialien, welche mit den Halbleiterprozessen nicht kompatibel sind. Der im Mikrogreifer integrierte Krachtsensor erhöht die Zuverlässigkeit von automatisierten Montageaufgaben.

Handhabung von Mikro- und Nanoobjekten (Uni Oldenburg)

Die Handhabung von Objekten im Rasterelektronenmikroskop (REM) ist wegen dem beschränkten Platz und der Vakuumumgebung sehr anspruchsvoll. In diesem Versuch wurden mikroskopisch kleine Siliziumnanoröhrchen (Länge ca. 10 μ m, Durchmesser ca. 500 nm) und Glaskugeln (Durchmesser ca. 20 μ m) mittels eines piezoelektrischen Positioniersystems und eines Mikrogreifers kontrolliert, einzeln aufgenommen und an einer definierten Stelle wieder abgesetzt (Bild 4). Hierbei spielt der integrierte Krachtsensor eine wesentliche Rolle, da die-

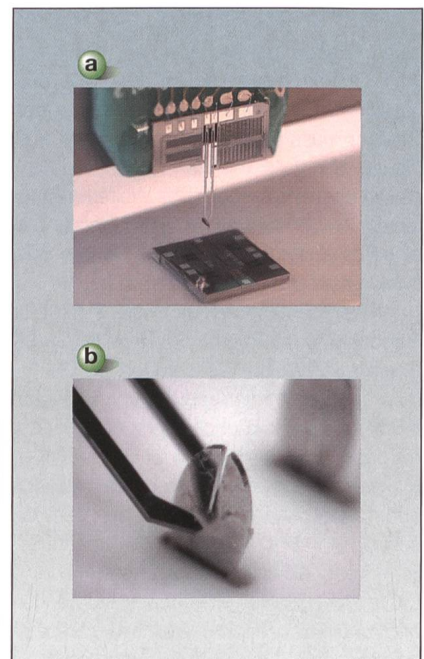


Bild 3 Mithilfe von Mikrogreifern lassen sich verschiedene Baugruppen (Bild 3a) und Bauteile (Bild 3b) mikrometergenau zusammensetzen und komplexe 3-dimensionale Strukturen herstellen.

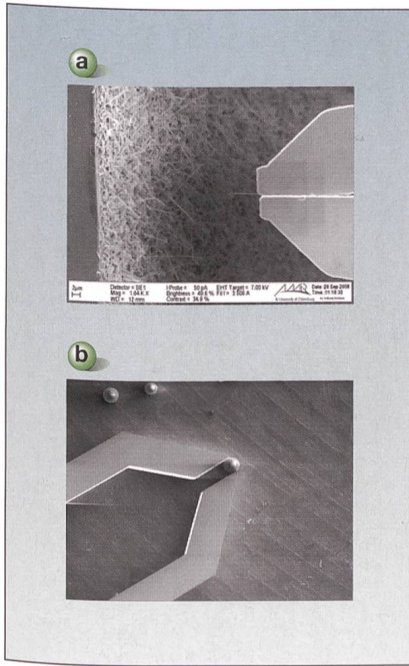


Bild 4 Handhabung von Siliziumnanoröhrchen (Bild 4a) und Glaskugeln (Bild 4b) im Rasterelektronenmikroskop.



Bild 5 Das Tastempfinden des *Caenorhabditis elegans* wird mithilfe des MEMS-Mikrokräftensensors studiert.

ser es erlaubt festzustellen, ob die Kugel oder das Nanoröhrchen erfolgreich aufgenommen wurde.

Berührungsempfindlichkeit von *Caenorhabditis elegans* (Stanford Uni)

Der *C. elegans* – ein Fadenwurm – wird studiert, um das Tastempfinden, genauer die Umwandlung von mechanischen Kräften in elektrochemische Signale, zu verstehen (Bild 5). Im Gegensatz zur herkömmlichen Methode erlaubt der MEMS-Mikrokräftensensor signifikant bessere Kraft- und

Zeitauflösung und Wiederholbarkeit. Im Experiment wurde untersucht, welche Kraft (Dauer und Amplitude) der Wurm auf die Sensorspitze ausübt, bevor er wegen der zu grossen Kraft die Richtung wechselt. Um die Kontaktfläche zwischen Wurm und Sensor zu reduzieren, wurde auf die Sensorspitze ein Wolframdraht (Durchmesser < 100 nm) aufgeklebt [2].

Flugkraftmessung beim Insektenflug (Uni und ETH Zürich)

Die Fruchtfliege (*Drosophila melanogaster*) ist ein Modellorganismus, der von Biologen bereits seit über einem Jahrhundert studiert wird. Aufgrund der beeindruckenden Flugmanöver wird die Fruchtfliege auch für die Entwicklung von fliegenden Mikrorobotern untersucht. Um den Insektenflug genauer verstehen zu können, werden die Kräfte, welche beim Flug auftreten, mittels Mikrokräftensensoren gemessen. Dazu wird die Fruchtfliege am Rücken an einem Kraftsensor festgeklebt (Bild 6). Die Fruchtfliege führt während 1 s ungefähr 200 Flügelschläge durch. Der dabei entstehende Kraftverlauf im Mikronewtonbereich wird mit einer Abtastrate von mehreren Kilohertz gemessen [3].

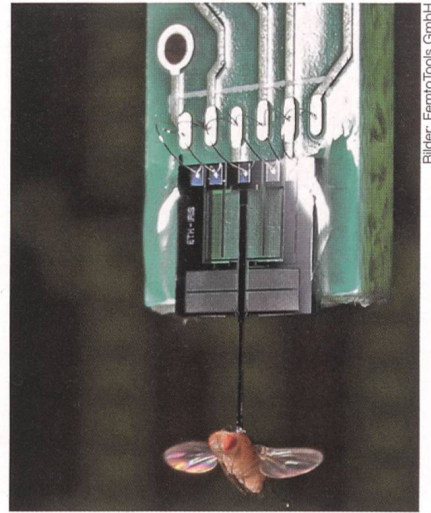


Bild 6 Die Flugkraft der *Drosophila melanogaster* wird gemessen, indem die Fruchtfliege an einen Kraftsensor geklebt wird.

- [3] C.F. Grätzel, S.N. Fry, F. Beyeler, Y. Sun, and B.J. Nelson: Real-Time Microforce Sensors and High Speed Vision System for Insect Flight Control Analysis, Springer Tracts in Advanced Robotics, 39:451-460, 2008.

Angaben zu den Autoren

Zoltán Nagy ist diplomierter Maschineningenieur ETH und arbeitet zurzeit an seiner Dissertation im Bereich Mikrorobotik für medizinische Anwendungen. Er ist Gründer und Verkaufsleiter von FemtoTools GmbH.

FemtoTools GmbH, 8092 Zürich,
zoltan.nagy@femtotools.com

Dr. **Felix Beyeler** ist diplomierter Maschineningenieur ETH und hat sein Doktorat 2008 im Bereich Mikrotechnik/Mikrorobotik abgeschlossen. Er ist Gründer und Geschäftsführer von FemtoTools GmbH.

FemtoTools GmbH, 8092 Zürich,
felix.beyeler@femtotools.com

Referenzen

- [1] J.J. Abbott, Z. Nagy, F. Beyeler, and B.J. Nelson: Robotics in the Small, Part I: Microrobotics, IEEE Robotics and Automation Magazine, 14(2):92-103, 2007.
- [2] J.C. Doll, S. Muntwyler, F. Beyeler, S. Geffeney, M.B. Goodman, B.J. Nelson, B.L. Pruitt: Measuring *C. Elegans* Touch Sensitivity, Proc. in the 5th International Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology (MMB), Québec, Canada, April 2009.

Résumé

A la découverte du monde microscopique

Le travail avec les micro-objets. Le maniement des objets microscopiques trouve d'importantes applications dans le montage d'ensembles électroniques et mécaniques extrêmement petits, dans la recherche sur les matériaux ainsi que dans la recherche biologique et biomédicale. Comme dans le domaine de la robotique conventionnelle, la microrobotique sert au prélèvement, au positionnement et à la pose d'objets ainsi qu'à l'assemblage de divers composants. La possibilité de percevoir l'environnement au moyen de capteurs, comme des caméras ou des capteurs de contact, est tout aussi importante. Le robot doit être à même d'exécuter une tâche donnée de manière intelligente.

Besuchen Sie ...

www.technik-museum.ch

www.soiree-electrique.ch

www.elektrojob.ch



PATRICK URFER

Produktmanager Telekom-Komponenten
Nexans Cortaillod

« In tausend Jahren wird es die Glasfaserkabel der Nexans immer noch geben. Das ist ein schönes Beispiel für **nachhaltige Entwicklung**. »

Um universell zu sein, muss sich die Glasfaser an die ganze Infrastruktur anpassen. Die globalen Lösungen der Nexans entsprechen einer solchen Herausforderung, von den Hochdichtitäts-Kabelend-verteiltern (HDODF) bis zum Abonnementanschluss.



[Zahlreiche Kunden in Europa vertrauen Nexans für die Entwicklung ihrer FTTx Infrastruktur]

Nexans

Nexans Schweiz AG 2, rue de la Fabrique CH-2016 Cortaillod www.nexans.ch

Globale Kompetenz in
Kabel und Kabelsystemen



accredited by the SUC -
Swiss University Conference

international institute of
management in technology
University of Fribourg
Bd de Pérolles 90
CH-1700 Fribourg
Phone: +41 26 300 84 30
Fax: +41 26 300 97 94
e-mail: info@iimt.ch

www.iimt.ch

Weiterbildung im Energiebereich – Ihr Erfolgsrezept

Das **international institute of management in technology (iimt)** der Universität Fribourg ist ein Kompetenzzentrum im Weiterbildungsbereich und bietet einzigartige universitäre Lehrgänge in **Energie-Management** (Utility-Management) an.

Executive MBA, Executive Diploma oder einzelne Fachkurse

Ein internationales Netzwerk von exzellenten Dozierenden und Spezialisten aus der Branche vermitteln Ihnen top-aktuelles Know-How und wertvolle Einblicke in die Praxis. Melden Sie sich noch heute für eine Informationsveranstaltung in Ihrer Nähe an!

Nächste Informationsveranstaltungen in Ihrer Nähe:

Zürich	18.11.2009	18:00 - 20:00
Fribourg	15.12.2009	18:00 - 20:00

Weitere Informationen sind unter www.iimt.ch erhältlich.

Sind Sie bereit für den nächsten Karriereschritt?

The iimt Executive Programmes - a world of opportunities

