

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 86 (1995)

Heft: 21

Artikel: Mikrosystematik : eine Technologie mit Zukunft : Teil 2 : Systemaspekte und Beispiele

Autor: Buser, Rudolf A.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-902499>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.05.2025

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

Nachdem im ersten Teil dieses Artikels die Prinzipien und die Komponenten besprochen wurden, soll in diesem Teil der Systemaspekt behandelt werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich ein Mikrosystem zwar gedanklich ebenso wie ein Makrosystem in Funktionsblöcke aufteilen lässt, dass aber bei der Realisierung immer ein Gesamtkonzept entworfen werden muss. Die Ursache dafür ist einerseits die Miniaturisierung und andererseits die spezielle Art der Fabrikation beziehungsweise Integration. Ausgewählte Beispiele sollen die gelungene Integration veranschaulichen.

Mikrosystemtechnik – eine Technologie mit Zukunft

Teil 2: Systemaspekte und Beispiele

■ Rudolf A. Buser

Top-down-Ansatz

Betrachtet man ein System vom Standpunkt eines möglichen Benutzers aus, so lässt sich sagen, dass alle Systeme, welche letztlich nur der Informationsbeschaffung dienen, miniaturisiert werden sollten. Dies dient einerseits der Kostenreduktion (z. B. Computer), und andererseits erschliesst es neue Märkte (z. B. Walkman), neue technische Möglichkeiten überall dort, wo Platzlimiten (Medizinaltechnik) oder Gewichtslimiten (Flugzeug, Weltraumtechnik) bestehen. Aber auch für Systeme, welche aktive mechanische Teile beinhalten (Aktoren), besteht ein Trend, wenn nicht gar ein Zwang zur Miniaturisierung. Den Informationsbeschaffungsteil zu verkleinern, ist selbst dann

sinnvoll, wenn der Aktor selbst makroskopisch ist. Kann sich beispielsweise ein Roboterarm mit eingebauter Regelelektronik selbst kontrollieren (Rückkopplung), braucht es nur noch wenige, langsame Steuerleitungen und nicht mehr viele, schnelle Rückkopplungsleitungen (verteilte Intelligenz, in der Biologie Ganglien).

Im Zusammenhang mit Fuzzy Logic ist deutlich geworden, dass nicht immer eine möglichst genaue Messung einer spezifischen Messgrösse das absolute Ziel ist, sondern dass es wesentlicher sein kann, unter welchen Begleitumständen ein bestimmter Messwert auftritt. Es kann zum Beispiel sein, dass nur ein gleichzeitiges Auftreten eines hohen Druckes und einer hohen Temperatur eine Reaktion erfordert, während die Kombination hoher Druck und niedrige Temperatur keine Reaktion nach sich zieht. Mehrere Sensorsignale, sei es nun von verschiedenen oder gleichen Sen-

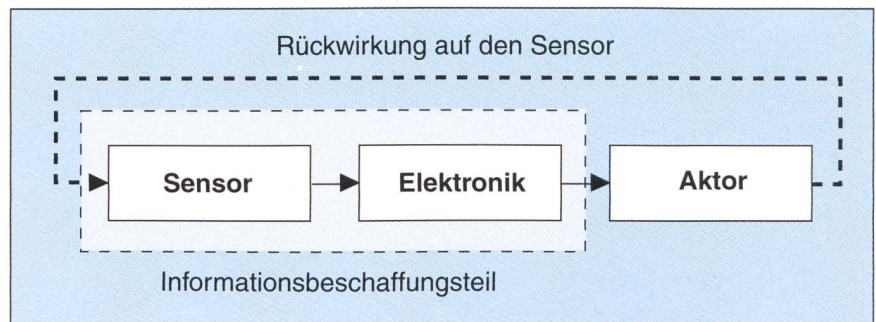


Bild 10 Geregeltes Mikrosystem

Adresse des Autors:

Prof. Dr. Rudolf A. Buser, Institut für Mechanik,
ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

soren (Sensorfeld), haben oft nur den Zweck, eine letztlich einfache Information zu kreieren, beispielsweise um eine Verschiebung eines Ventils oder Roboterarms auszulösen. Es ist deshalb äusserst sinnvoll, möglichst viel von der Informationsverarbeitung auf eine niedrige Ebene zu legen. Man erhöht die Reaktionsgeschwindigkeit und hält die Datenmenge gering, die zur Zentraleinheit fliessen muss.

Speziell interessant wird der Aspekt der Miniaturisierung, wenn der Aktor selbst auf die Mikrowelt ausgerichtet ist, weil er dann unter Umständen in die Mikrointegration einbezogen werden kann. Dabei können auch kleine Aktoren grosse Dinge bewirken: Um einen Laserstrahl abzulenken, bedarf es einer Fläche von lediglich $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$. Ebenso können kleine Aktoren die Strömungsverhältnisse an Flugzeugflügeln so stark verändern, dass makroskopische Kräfte auftreten [10].

Weitere Probleme, welche das Mikrosystem lösen kann, sind

- aktive Messtechnik, Probenpräparation
- Transportprobleme
 - Stoffe: Geschwindigkeit
 - Energie: Menge
 - Signal: Signalstöranfälligkeit
 - Information: Kompaktheit
- schiere Grösse, weniger Kabel, Gewicht usw.

Integration

Ein System ist die Verknüpfung von einem oder mehreren Elementen oder Teilsystemen, welche eine oder mehrere Funktionen auszuführen haben. Solche Top-down-Lösungsansätze eignen sich bei makroskopischen Systemen wie beispielsweise bei einem Automobil sehr gut, weil die Teilsysteme eindeutig definiert und – was für unsere Betrachtungen ganz entscheidend ist – unabhängig voneinander produziert werden können. Im Automobilbau äussert sich dies in der grossen Zahl der Zulieferanten von Teilsystemen.

Eine solche Ausgliederung ist in der Mikrosystemtechnik nicht mehr möglich, weil diese ja Integration zum Ziel hat. Integration bedeutet Zusammenfassen von gleichen Produktionsschritten oder Funktionalitäten verschiedener Teilsysteme mit dem Ziel der Vereinfachung, Verkleinerung und Verbilligung. Dies kann natürlich nur erreicht werden, wenn die Blackbox der Teilsysteme aufgeschlossen wird, also ein Gesamtsystem zur Diskussion steht. Damit entsteht aber ein Problem, welches eben mit einem Systemansatz zur Problemlösung beseitigt wurde, nämlich die Kopplung der Teilsysteme, sei es im Betrieb oder in der

Produktion. Verbesserung an der einen Stelle kann Verschlechterung an einer anderen bedeuten. Es ist daher nicht verwunderlich, dass sich die Mikrosystemtechnik nicht aus Top-down-Ansätzen heraus entwickelt hat, aus Ansätzen also, bei denen zuerst die Funktionalität des Gesamtsystems definiert, anschliessend Teilsysteme ausgegliedert und am Schluss noch die Produktion festgelegt wurde, sondern gerade umgekehrt. Am Anfang stand die Möglichkeit der Produktion einer bestimmten Funktion und insbesondere deren Miniaturisierung. Die Kombination von sensorischen mit mechanischen Funktionen führt auf sogenannte Smart Materials, Materialien also, welche über ihren aktuellen Zustand laufend Auskunft geben können. Beispielsweise kann mit in Silizium eindiffundierten Piezowiderständen, ohne dass dadurch das Material wesentlich geändert wurde, laufend der Spannungszustand gemessen werden.

Die Kombination sensorischer Funktionen mit elektronischen führt auf Smart Sensors, Sensoren also, welche eine gewisse Informationsverarbeitung gleich auf dem Sensorchip integriert haben (Beispiele Verstärkung, Kompensation, Multiplexen).

Die Kombination sensorischer Funktionen mit elektronischen, mechanischen, optischen usw. führt auf komplette Mikrosysteme. Unter Mikrosystemen ist also die extreme Miniaturisierung von Komplexität (d. h. mehrere Aufgaben lösen) zu verstehen und nicht so sehr die Miniaturisierung der Modularität.

Kompatibilität

Im Gegensatz zu den gut entwickelten mikroelektronischen Teilsystemen, welche beispielsweise zu Asic (Application Specific Circuits) führen, stecken die mikro-mechanischen und mikrooptischen Komponenten selbst als Teilsysteme noch in den Kinderschuhen. Insofern steht hier noch einiges an Entwicklungs- und Standardisierungsarbeit an.

Die Hauptproblematik besteht in der Tatsache, dass sich beispielsweise ein kapazitiver Drucksensor von einem piezoresistiven

in seinem Aufbau und damit in seinem Herstellungsprozess grundsätzlich unterscheidet, ganz in Gegensatz zur Mikroelektronik, wo der Herstellungsprozess zum Teil völlig vom Design abgekoppelt ist und sich nur in sogenannten Design Rules äussert, beispielsweise bei einem CMOS-Chip, wo die Technologie fix ist und das Design allein die Funktion bestimmt. Dies führt dazu, dass der Gesamtprozess noch lange nicht kompatibel ist, selbst wenn die einzelnen Prozesse zueinander und insbesondere zur Mikroelektronik kompatibel sind. Der Prozess zur Herstellung eines optimalen Sensors beispielsweise ist, auch wenn dieser in einer CMOS-Linie hergestellt wird, deswegen noch nicht unbedingt CMOS-kompatibel. Ein Prozess zur Herstellung eines Mikrosystems muss daher immer aus einem Guss sein, und dies ist der Tod des Systemgedankens, mindestens auf der Herstellungsseite. Man kann nämlich den Herstellungs- oder Konzeptionsprozess nicht in in sich abgeschlossene Teilbereiche mit wohldefinierten Interfaces unterteilen. Es ist bestenfalls möglich, einen Standardprozess für eine bestimmte Klasse von Mikrosystemen zu etablieren, zum Beispiel piezoresistive Drucksensoren mit Bipolarelektronik, ähnlich beispielsweise Bicmos oder Kombinationen von Si- mit GaAs-Technologien. Meist müssen aber dabei gewisse Kompromisse eingegangen werden, was heisst, dass die einzelnen Funktionsblöcke nicht mehr optimal sind. Es wäre nun Aufgabe der Mikrosystemtechnik, Technologien zu entwickeln, welche möglichst viele Prozesse der Mikromechanik, Mikroelektronik und der Mikrooptik beinhalten, und diese im Hinblick auf eine möglichst unbehinderte Funktionalität und Zuverlässigkeit der Teilbereiche hin zu optimieren.

Leider sieht die tatsächliche Forschungsfrente wesentlich anders aus. Da schon die mikroelektronischen Standardprozesse, weil sehr forciert, relativ labil sind, kann eine Optimierung nur in der Industrie erfolgen, wo mit hohen Stückzahlen Durchlauf um Durchlauf fein adjustiert werden kann. Bei Zuintegration eines fremden Prozessschritts erhöht sich der Aufwand überproportional; für eine einzelne Forscher-

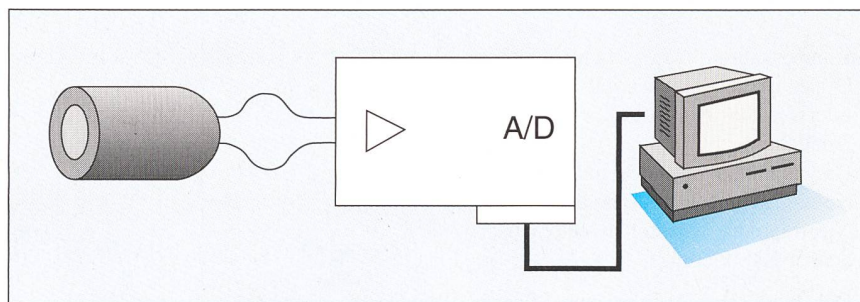


Bild 11 Klassischer Aufbau eines Sensorsystems

gruppe, für die kein Profit den Aufwand rechtfertigt, ist er unerschwinglich. Daher werden entweder an einen Standardprozess der Mikroelektronik weitere Prozessschritte angehängt, die den mikromechanischen Teil erzeugen (Postprocessing), oder es wird versucht, einem mechanischen Sensor ausserhalb des Industrieprozesses etwas Elektronik dazuzuintegrieren. Im ersten Verfahren riskiert man einen schlechten Sensor, da man in den Möglichkeiten sehr eingeschränkt ist (beispielsweise verträgt die Elektronik keine Hochtemperaturschritte mehr), und im zweiten Verfahren eine schlechte Elektronik, weil der Sensor Kompromisse erfordert. So oder so sind die Kosten einer Integration heterogener Komponenten enorm hoch. Daher sieht man eigentliche Mikrosysteme in obigem Sinne noch relativ wenig. Logischerweise sind die Erfolge bisher dort am grössten, wo die zu integrierenden Technologien am ähnlichsten sind, insbesondere, wo keine beweglichen Teile benötigt werden wie beispielsweise bei den magnetischen und optischen Sensoren.

Ein Mikrosystem wird daher wohl noch lange hybrid sein. Hybrid heisst, einzelne Chips verschiedener Herkunft werden auf ein mit Hilfe der Dickfilmtechnik präpariertes Keramiksubstrat aufgebracht. Bei hybrider Fertigungstechnologie spielt der Systemgedanke auch für die Herstellung, weil einzelne Baugruppen unabhängig voneinander miniaturisiert und optimiert werden können. Sind die Basistechnologien dieselben, kann natürlich der Infrastrukturaufwand verringert werden. Zudem ergeben sich auch technologische Vorteile: Sind beispielsweise alle Chipsubstrate aus dem gleichen Material (z. B. Si), kann eine Hybridplatte mit einem angepassten thermischen Ausdehnungskoeffizienten verwendet werden.

Beispiele von Systemen

Sensor und Elektronik

Vom Standpunkt eines Sensorherstellers soll die Erweiterung des reinen Sensors zu einem System folgende Probleme lösen:

- Signalaufbereitung (Verstärkung, Multiplexen)
- Kompensation von Nichtidealitäten: Offset, Drift, Nichtlinearität
- Interface für den Anschluss an einen Standardbus
- Umwandlung von Signal in Information
- Kombination von Information
- Nichtreproduzierbarkeiten (automatische Sensor-Kalibrierung)

Der klassische Aufbau eines Sensorsystems besteht heute noch meist aus einem

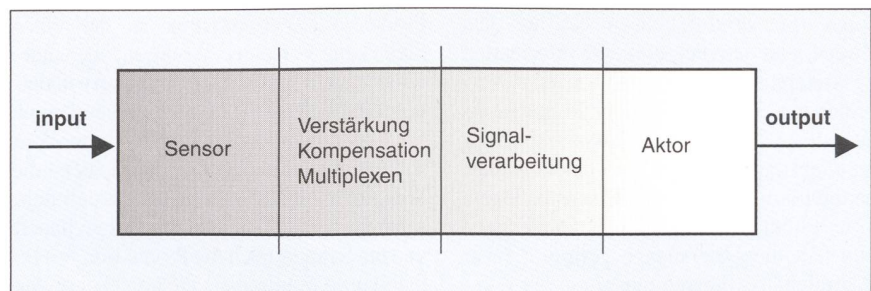


Bild 12 Verschiedene Trennstellen zwischen «on chip» und «off chip»

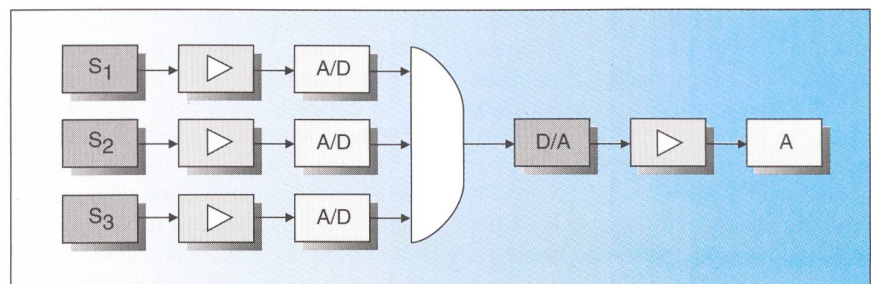


Bild 13 Denkbare Integration von mehreren Sensoren, Logik und Aktuatorik

Sensor, welcher ein analoges Signal liefert, einer Elektronikarte, welche die Verstärkung, Kompensation und die A/D-Wandlung übernimmt, sowie einem Computer, welcher weitere Kompensationen vornimmt und anschliessend aus den Daten (sinnvolle) Information macht.

Es stellt sich natürlich die Frage, wieviel Elektronik integriert werden soll (Bild 12). Die Antwort ist letztlich durch die Kostenfrage gegeben, wobei nicht nur die Produktion, sondern auch der Entwicklungsaufwand mitbestimmend ist. Ein weiterer Punkt ist die Flexibilität eines einmal entwickelten Prozesses und damit auch der Stückzahlen.

Der Integrationsgrad intelligenter Sensoren kann damit unterschiedlich sein:

1. Verstärkung und/oder Signalumwandlung (analog)
2. Multiplexen mehrerer Sensoren und Kompensationen (CCD, zweiter Sensor)
3. A/D-Wandlung: Denkbar sind komplexe Systeme, wie sie in Bild 13 dargestellt sind

Beispiel: Sensorverstärker

Für die Verstärkung gilt

$$v = \frac{U_a}{U_e} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2} \quad (\text{GL. 11})$$

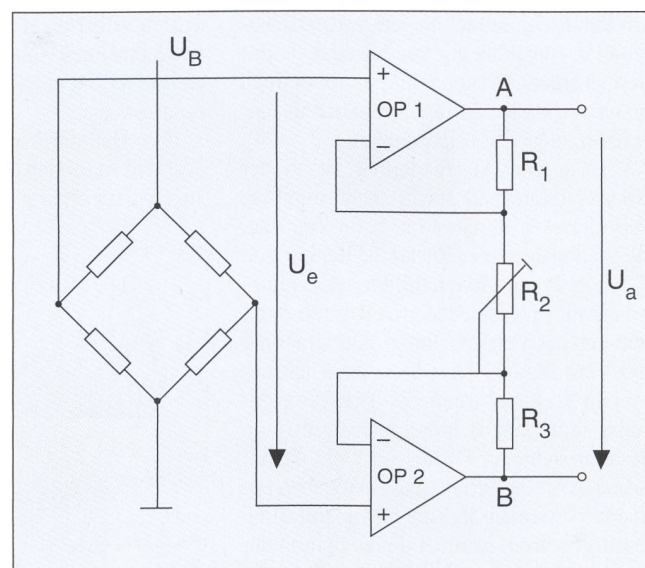


Bild 14 Symmetrische Differenzverstärkerstufe

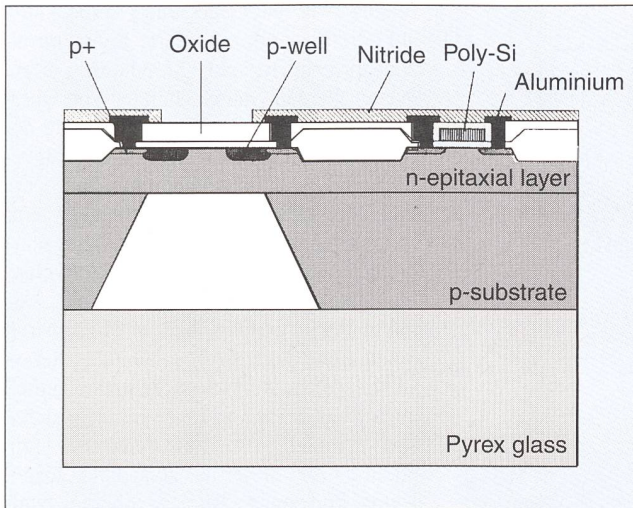


Bild 15 Querschnitt durch einen piezoresistiven Drucksensor mit integrierter Elektronik

Erklärung: Die Spannung an R_2 muss mit U_e übereinstimmen.

Infolge der Symmetrie der Schaltung kompensieren sich die Offsetspannungen der beiden Operationsverstärker weitgehend. Bild 15 zeigt einen Querschnitt durch den Sensor, den die Firma Bosch realisiert hat. Links ist die Membran mit den Piezowiderständen und rechts ein Transistor zu erkennen. Dabei wurde die oben abgebildete Kompensationsstufe (Bild 14, Temperaturkoeffizient der Sensitivität) eingebaut sowie weitere Verstärkungs- und Kompensationsstufen. Die Größe des gesamten Chips beträgt $3,9 \times 3,6 \text{ mm}^2$ [11].

Elektronik und Aktorik

Die Firma Texas Instruments hat einen integrierten Lichtmodulator vorgestellt, welcher 768×576 Aluminiumspiegel mit direkt darunterliegender CMOS-Elektronik elektrostatisch ansteuert [14]. Dank der kurzen Antwortzeit von etwa $10 \mu\text{s}$ können damit Fernsehbilder projiziert werden. Graustufen werden mittels verschiedener Verweilzeiten im Hellzustand im Auge erzeugt.

Sensor Aktorik

In der biomedizinischen Analysetechnik machen zunehmend Mikroanalysesysteme von sich reden, welche aus einer Pumpe, aus Mikroventilen und Kanälen sowie einer Reihe von integrierten Sensoren bestehen. Hier geht es vor allem darum, das Probenvolumen zu reduzieren. Es besteht daher keine direkte Notwendigkeit, die Elektronik selbst mitzuintegrieren.

Sensor mit Elektronik, Optik und Mechanik

Das Bild 17 zeigt einen auf einem Interferometer basierenden Drucksensor [12]. Auf dem Chip ist als optische Komponente ein Wellenleiter aus SiON realisiert, die

Elektronik (Verstärker und der Photodetektor) ist in der CMOS-Technologie hergestellt, und die Membran ist durch Löcher von der Frontseite geätzt und nachher wieder mit einem PECVD überdeckt. Sie kann auch als Si-Membran durch anisotropes Ätzen von der Rückseite hergestellt werden. Die Wellenleiter sind mit den Photodetektoren über einen Spiegel gekoppelt. Die maximale Betriebsfrequenz beträgt 15 MHz. Die Sensitivität beträgt $14 \mu\text{V/mbar}$.

Ausblick

Wir haben jeweils nur wenige Beispiele von Sensoren, Aktoren und passiven Strukturen gesehen. Selbstverständlich ist die Zahl der möglichen Anwendungen weit größer. Allein die Tatsache der Interdisziplinarität des Gebietes (Physik, Chemie, Ingenieurwissenschaften, Biologie Mathematik, Informatik) lässt Synergien erhoffen, die zu neuen Möglichkeiten und Systemlösungen führen. Als Beispiel kann die Liga-Technik, eine Kombination aus

Hochenergiephysik und klassischer Galvanotechnik, genannt werden.

Ein treibender Faktor für die Anwendung mikrotechnischer Systeme könnte die Möglichkeit sein, in derselben Fabrik die Elektronik, die Sensorik und zum Teil die Aktorik zu fertigen. Dies schlägt insbesondere dann zu Buche, wenn die Infrastruktur sehr teuer ist. Der Schritt ist dann nicht mehr weit zu einem Computer Integrated Manufacturing.

Für die Einzelkomponenten wird vor allem das Wissen über Materialeigenschaften entscheidend sein. Wenn man Produkthaftung zu berücksichtigen hat, muss man nicht nur eine bestimmte Funktion erfüllen, sondern auch eine gewisse Garantie abgeben; und die lässt sich am besten erreichen, wenn man die Funktion überprüfen kann. Dies kann aber beispielsweise eine Stahlkugel-Feder-Konstruktion als Beschleunigungssensor nicht mehr leisten. Die Firma IC Sensors in Kalifornien stellt bereits mehrdimensionale Beschleunigungssensoren her, also komplexe Funktionen, deren Fertigung mit den üblichen Herstellungsmethoden zu kompliziert wäre.

Prognos-Untersuchungen zeigen einen zivilen Weltmarkt von etwa 50 Mrd. Franken [13], wobei der Hauptanteil bei den mechanischen Sensoren zu orten ist. Selbst wenn nur ein Teil davon als Mikrosysteme verwirklicht wird, haben wir es mit einem bedeutenden Marktsegment zu tun. An erster Stelle stehen aber nach wie vor Einzelkomponenten, vor allem Drucksensoren und Beschleunigungsaufnehmer. Als nächstes sind wahrscheinlich Durchflusssensoren marktreif. Auf der Aktorikseite ist ein starkes Interesse der chemischen Industrie an Mikroanalysesystemen mit entsprechenden Pumpmechanismen zu spüren. In diesem Zusammenhang sind natürlich auch die chemischen Mikrosensoren wichtig. Die Miniaturisierung des Gesamtsystems als solches steht etwas im Hintergrund, da es

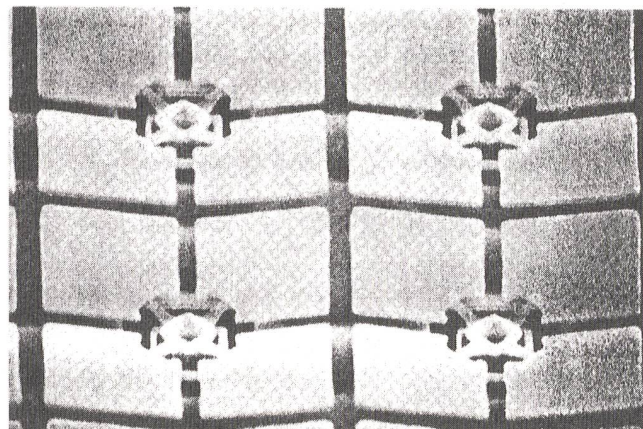


Bild 16 Abbildung eines Aluminiumspiegelchens, welches an zwei Diagonalepunkten aufgehängt ist [14]

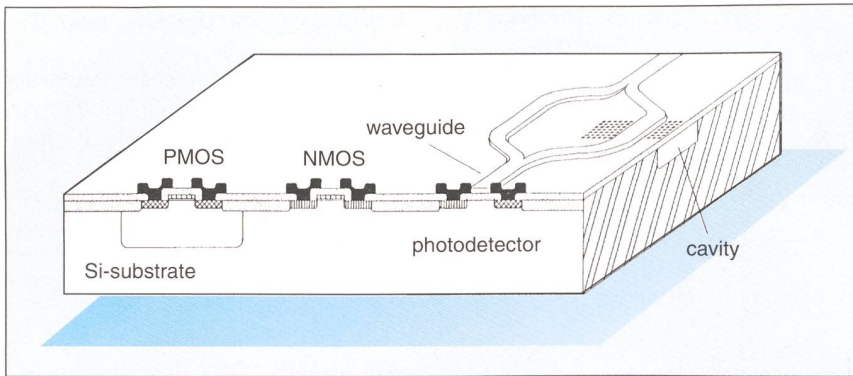


Bild 17 Mikrooptischer Drucksensor

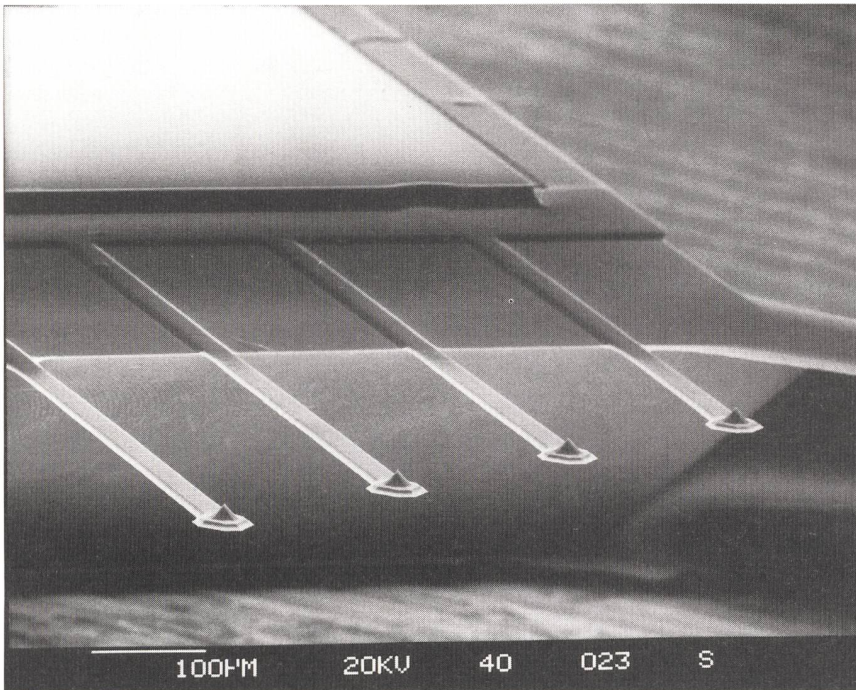


Bild 18 Mehrere AFM-Balken mit integrierten Spitzen an einem Chip [13]

im wesentlichen um die Miniaturisierung der Proben volumina geht und das Analysegerät selbst durchaus eine gewisse Grösse haben darf. Maschinen und Geräte können in ihrer Leistungsfähigkeit massiv verbessert werden, wenn geregelte Systeme hinzugefügt werden (Beispiel: geregelter Katalysator). Dabei lassen sich kompakte Systeme leichter, das heisst ohne Konstruktionsänderungen, an bestehenden Anlagen anbauen.

Die Miniaturisierung der Mechanik hat uns jedenfalls, wie das Beispiel des Kraftmikroskops zeigt, an die Grenze des Atoms gebracht. Eine zusätzliche Parallelisierung, wie sie der Mikrotechnik inhärent ist (Bild 18), bedeutet eine entsprechende Erhöhung der Kapazität des Informationstransfers, und zwar für den Lesemodus (AFM-Sensor) und den Schreibmodus (AFM-

Aktor zur Veränderung von Atom-Molekülageln).

In der Forschung und Entwicklung sind neben den Problemen der Integration

Fragen wie Montage und Verpackung, auf Mikrotechnik optimierte Signalumsetzungsprinzipien und Simulation offen. Weiter werden Untersuchungen von Oberflächenzuständen für die Optimierung der Systeme entscheidend sein. In Japan investiert das Miti 250 Mio. Franken in ein Forschungsprogramm für Mikrosystemtechnik (25 billion yen 10-year large scale project entitled «Research and Development for Micromachine Technology», started in 1991 by Miti's Agency of Industrial Science and Technology). Mikrorobotersysteme, welche Rohrleitungen und eventuell auch Blutgefässe von innen her inspizieren und eventuell sogar reparieren, sind ein erklärtes Ziel dieser auf zehn Jahre ausgelegten Forschung. Auch wenn dies vielleicht etwas optimistisch ist, zeigt es doch, was durch die Mikrosystemtechnik heute denkbar geworden ist.

(Teil 3 folgt in Bulletin Nr. 25/95)

Literatur

- [10] Ch. Liu et al.: Out of Plane Permalloy Magnetic Actuators for Delta-Wing Control, Proc. of MEMS, Amsterdam 1995, IEEE Cat. Nr. 95CH35754, p. 7.
- [11] H.-J. Kress, F. Bantien, J. Marek and M. Willmann: Silicon pressure Sensor with Integrated CMOS Signal-conditioning Circuit and Compensation of Temperature Coefficient. Sensors and Actuators A25-27(1991), pp. 21-26.
- [12] U. Hillerlingmann, St. Adams, K. Goser: Micro-mechanic Pressure Sensors with Optical Readout and «on Chip» CMOS Amplifiers Based on Si-Technology. Microsystem Technologies '94, 4th International Conference on Micro Electro, Opto Mechanical Systems and Components, Oct. 19-21, 1994, p. 713.
- [13] Prognos: ITG-Tagung 1989, Achim Zereesen, Stein am Rhein, März 1989.
- [14] J. Brugger, R. A. Buser and N. F. de Rooij: Silicon Cantilever and Tips for Scanning Microscopy. Sensors and Actuators A 34(1992), pp. 193 to 200.
- [14] J. B. Sampell: The digital micromirror device and this application to projection displays. Digest of the 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Transducers 93, Yokohama, June 7-10, 1993, p.24.

Les microsystemes – une technologie d'avenir

Partie 2: Aspects systemiques et exemples

Après que la première partie de cet article avait traité des principes et composants, cette deuxième partie en commente l'aspect systemique. On peut conclure qu'un microsysteme se laisse partager mentalement, il est vrai, en blocs fonctionnels à l'instar d'un macrosysteme mais que la réalisation implique toujours l'établissement d'un concept global. La cause à cela est d'une part la miniaturisation et de l'autre le mode spécial de fabrication respectivement d'intégration. Des exemples sélectionnés illustrent l'intégration réussie.