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: 17

Artikel: Mikrosystemtechnik : eine Technologie mit Zukunft : Teil 1 : Grundlagen

Autor: Buser, Rudolf A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902471

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: 10.12.2025

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

Der Artikel gibt eine Übersicht über die Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik in Industrie und Forschung. Einige grundsätzliche Überlegungen sowie ausgewählte Beispiele sollen den Leser in das Gebiet einführen. Im vorliegenden ersten Teil wird erklärt, worum es bei der Mikrosystemtechnik geht und wie sich die Mikrosystemtechnik entwickelt hat. In einem zweiten Teil wird dann näher auf Systemaspekte eingegangen und anhand von Beispielen gezeigt werden, wo Probleme liegen und wo die Technik heute steht. Eine Übersicht über die Herstellungstechnologien wird in einem dritten Teil gegeben werden.

Mikrosystemtechnik – eine Technologie mit Zukunft

Teil 1: Grundlagen

■ Rudolf A. Buser

Der Begriff der Mikrosystemtechnik kam auf, als sich abzeichnete, dass neben der allseits bekannten Mikroelektronik auch weitere Bauteile, insbesondere mechanische, mit derselben Technologie, Präzision

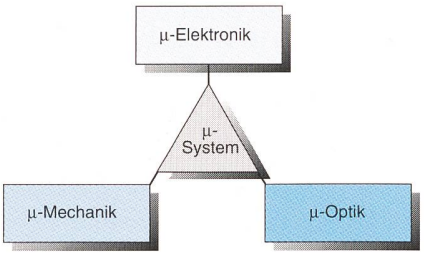


Bild 1 Die Mikrosystemtechnik basiert auf drei Technologien

und sogar demselben Material, nämlich Silizium, hergestellt werden können. Daran waren natürlich auch Hoffnungen geknüpft, insbesondere bezüglich Herstellungskosten und – als nächstem naheliegendem Schritt – der Integration von mechanischer Funktion und elektrischer Signalverarbeitung auf einem Chip. Da sich auch optische Elemente wie Wellenleiter, Spiegel und Detektoren in Silizium realisieren lassen, wurde ein Dreieck sichtbar, aus dem sich im Prinzip eine unendliche Anzahl neuer Funktionen kombinieren lassen (Bild 1). In vermindertem Umfange ist ähnliches auch mit GaAs möglich, da auch hier nebst elektronischen und optischen Komponenten eine dreidimensionale Strukturierung möglich ist. Weiter öffnete die Verwendung von Dünnschichten mit bestimmten Funktionen (z. B. piezoelektrische, Absorption von Chemikalien) eine breite Basis von Anwendungsmöglichkeiten. Das Liga-Verfahren[1] erweiterte die Palette von Materialien nochmals beträchtlich.

Damit ergibt sich als Definition: Mikrosysteme sind aus mikroelektronischen, mikromechanischen und mikrooptischen Komponenten zusammengesetzte technische Systeme, wobei bei der Realisierung von Sensoren und Aktoren die verschiedensten physikalischen und chemischen Prinzipien angewendet werden. Die Mikrosystemtechnik befasst sich mit der Entwicklung, Herstellung und der Anwendung miniaturisierter Baugruppen. Ihr Ziel ist, zueinander kompatible Prozesse zu entwikkeln, welche die Herstellung integrierter Mikrosysteme ermöglichen. Mikrosystemtechnik ist also im wesentlichen Technologie und nicht oder noch nicht Methodik.

Dieser erste Teil befasst sich mit den grundsätzlichen Aspekten der Mikrosystemtechnik, deren Komponenten und Anwendungen.

[1] Ein Verfahren, welches Röntgen-Lithographie, Galvanik und Abformtechnik beinhaltet, siehe Teil 3.

Adresse des Autors:
Prof. Dr. *Rudolf A. Buser,* Institut für Mechanik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Die Teilsysteme

Bezeichnet man als System etwas, das aus Teilsystemen und Systemelementen zusammengesetzt ist, welche unter sich und mit der Aussenwelt durch den Austausch von Stoffen, Energie oder Information verknüpft sind, so könnte eine Abgrenzung der Teilgebiete wie folgt vorgenommen werden:

Die *Mikroelektronik* befasst sich mit der Informationsverarbeitung, mit möglichst geringem Energietransport und vernachlässigbarem Stofftransport.

Die *Mikrooptik* befasst sich mit:
- Informationstransport ohne Massentransport (Lichtwellenleiter);
- Energietransport ohne Massentransport (Laser);
- Modulation von Energie- oder Informationstransport (Sensor).

Die *Mikromechanik* befasst sich mit:
- statischen Konstruktionselementen;
- Massentransport oder -verschiebung;
- Umwandlung von Energie(änderung) in Information (Sensor);
- Umwandlung von Information in Energie(änderung) bzw. Massenverschiebung (Aktor).

Mikroelektronik

Die Mikroelektronik und allen voran die Siliziumtechnologie hat in den letzten zwanzig Jahren nicht nur die Verbreitung und Anwendung von Informatik-Hardware in unvorstellbarem Masse gefördert, sondern auch einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Produktionstechnik ausgeübt. Die planare Bearbeitung von Substraten (Wafern) mit photolithographischen Verfahren ermöglichte ein «Parallel Processing» von sonst nirgends erreichter Dichte. Nicht nur haben auf einem Wafer tausend und mehr Schaltungen Platz, sondern es können bei den meisten Prozessschritten gleich mehrere Wafer, typischerweise 25–50, gleichzeitig bearbeitet werden. Dies ermöglichte neben der Miniaturisierung jene enorme, die Elektronik in besonderer Weise kennzeichnende Kostenreduzierung, welche bei gleichzeitiger Zunahme der Komplexität der Schaltungen und der Herstellung abläuft. Sie war möglich, weil die Prozesse extrem perfektioniert wurden. Augenfällig wird dies beim Betrachten von Reinräumen für die Chip-Herstellung mit ihrem gewaltigen (und teuren) Maschinenpark.

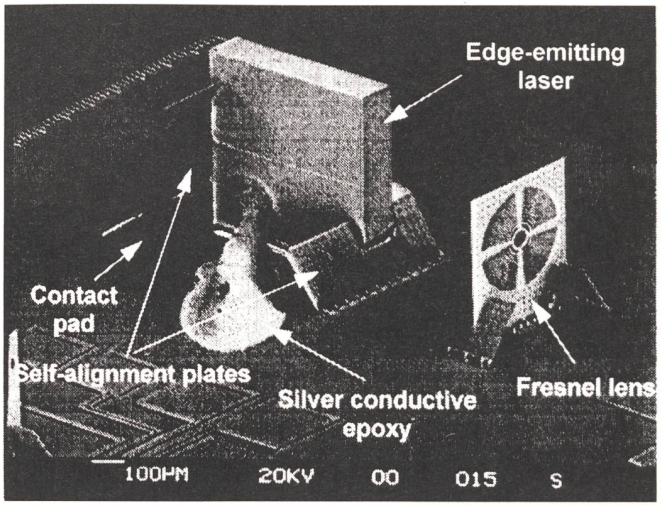
Mikrooptik

Das Licht muss erzeugt, geleitet, fokussiert, defokussiert, abgelenkt, moduliert und detektiert werden. Der Raumbedarf ist dabei im wesentlichen durch die Leistung bestimmt, ähnlich wie in der Elektronik, und auch hier ist dieser Bedarf bei reiner Informationsbeschaffung und eventueller Verarbeitung relativ gering.

Wellenleiter sind sehr leicht als Dünnschichten (Beispiel: SiON) auf Siliziumsubstrate aufzubringen und entsprechend zu strukturieren. Damit können beispielsweise Interferometer oder optische Koppler hergestellt werden. Aktive Komponenten wie Lichtemissionsdioden werden in GaAs hergestellt. Dieses lässt sich wie gesagt ebenfalls mikrostrukturieren. Fresnellinsen oder auch kontinuierliche Linsen lassen sich durch geeignete Ätztechniken herstellen.

Nebst der planaren Integration von optischen Elementen gibt es neuere Ansätze, mit mikromechanischen Methoden eine miniaturisierte optische Bank zu realisieren. Das Bild 2 zeigt eine Laserdiode und eine Fresnellinse, welche separat gefertigt, auf einen Chip aufgebaut, kontaktiert und mit mikromechanischen Teilen in definierter Position befestigt wurden.

Bild 2 Mikrooptische Bank [1]



Mikromechanik

Natürlich schwimmt die Mikromechanik im Fahrwasser des Erfolges der Mikroelektronik, obwohl nicht anzunehmen ist, dass dieselbe Erfolgsstory auch für dieses neue Gebiet geschrieben werden kann. Der wesentliche Grund hierfür ist die Tatsache, dass in der Mikromechanik, wie wir weiter unten noch sehen werden, unterschiedliche Funktionen nur mit unterschiedlichen Prozessen erreicht werden können. Es ist aber unzweifelhaft, dass die Idee als solche, nämlich das photolithographische Verfahren sowie die Verwendung neuer Werkstoffe und dünner Filme, die Feinmechanik und was damit zusammenhängt langfristig massiv verändern wird. Das bis jetzt erfolgreichste Produkt der Mikromechanik, der piezoresistive Druckaufnehmer, wird in Autos serienmässig eingesetzt, beispielsweise für die Öldruckmessung [2]. Für Betrieb, Sicherheit und Komfort steht noch eine ganze Reihe weiterer Sensoren zur Diskussion [3]. Hier wird die Notwendigkeit besonders deutlich, auch in der Mechanik und insbesondere in der Feinmechanik einen Schritt in Richtung Integration zu tun, um den vorhandenen relativ billigen Mikroprozessoren die von den Systemen und der Umwelt stammenden Daten billig – und bei zunehmender Menge auch mittels kleinerer und leichterer Komponenten – zur Verfügung stellen zu können. Nur so lässt sich deren Potential voll ausschöpfen.

Mögliche Bauteile und Gebiete, für welche die Mikromechanik eine Rolle spielt, sind:

- Sensoren: Kraft, Druck, Beschleunigung, Fluss
- Aktoren: Mikroventile, Mikropumpen, Mikrogreifer
- Aufbau- und Verbindungstechnik: Justierhilfen für mikrooptische Bauelemente
- Vakuum-Mikroelektronik: miniaturisierte Trioden
- Atomic Force Microscopy
- Allgemeine mechanische Bauelemente: Düsen, optische Gitter

Komponenten der Mikrotechnik

Anhand einiger Beispiele soll der Stand der heutigen Technik dargelegt werden, wobei es natürlich unmöglich ist, eine auch nur annähernde Vollständigkeit zu erreichen.

Viele Basisstrukturen wie Balken, Membranen, Düsen, Brücken, Löcher können in Silizium hergestellt werden. Trockenätzen erlaubt auch Strukturen in andern poly-

kristallinen und amorphen Materialien anisotrop zu ätzen. Das Bild 3 zeigt Löcher von 100 µm Kantenlänge und von ähnlicher Tiefe für die Aufnahme von geordneten Keimlingen aus Diamantkörnern, aus denen epitaktische Schichten aufwachsen sollen. Diese genau dimensionierten Vertiefungen können auch als Mikroreaktoren genutzt oder in der Zellbiologie verwendet werden.

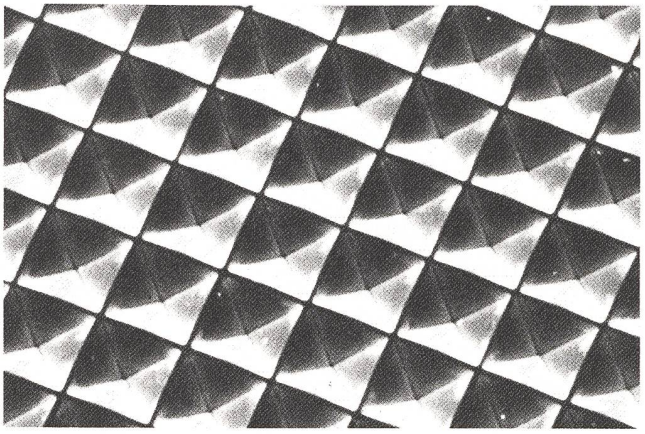


Bild 3 Löcher (100 mm) zur Aufnahme von Diamanten oder zur Nutzung als Mikroreaktoren

Sensoren

Das grosse Anwendungsgebiet ist sicher die Sensorik. Im Gegensatz zu einer Messung im Labor, wo die zu messende physikalische Grösse durch einen Vergleich mit ihrer Masseinheit auf eine Zahlangabe reduziert wird, muss bei einer Prozess- oder Funktionsüberwachung ein kontinuierliches Messsignal erzeugt werden. Mit Hilfe dieses kontinuierlichen Messwertes kann ein Prozess geregelt, das heisst trotz allfälliger Störungen in einem optimalen Arbeitspunkt gefahren werden (z. B. geregelter Katalysator). Dies im Gegensatz zu gesteuerten Prozessen, wo der Arbeitspunkt nur vom Soll-Wert, nicht aber vom Systemzustand oder Systemverhalten festgelegt wird.

Die Umwandlung der physikalischen oder chemischen in eine elektrische Messgrösse besorgen die Sensoren (Transducers), wobei die unterschiedlichsten Effekte ausgenutzt werden (Tabelle I).

Da die Elektronik und Informatik auf elektrischen Signalen beruht, sind die wichtigsten Effekte diejenigen, welche am Ende ein elektrisches Signal erzeugen (Tabelle I, grau schattiert). Dies ist um so wichtiger, weil auch die Signalleitung vorwiegend elektrisch erfolgt. Ein Ausnahme bilden die Lichtwellenleiter. Hier können optische Effekte direkt auf den Wellenleiter übertragen und die optischen Signale am Ende der Leitung über eine Photodiode in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Ein solches zweistufiges Prinzip kann natürlich auch vor Ort angewandt werden, kompliziert aber den Sensor entsprechend. Nachfolgend sollen einige Sensortypen besprochen werden.

Technische Sensortypen

Messgrössen sind Druck, Kraft, Beschleunigung, Temperatur, Drehraten, Fluss, Magnetfeld, Position. Die Vorschläge für deren mikromechanische Realisierung sind mittlerweile nicht mehr zu zählen. Wir wollen uns deshalb mit der Beschreibung des piezoresistiven Drucksensors als eines bis zur Industriereife gediehenen Vertreters begnügen.

Im allgemeinen wird ein länglicher Widerstand in eine Membran eindiffundiert. Die auf ihn wirkende (mechanische) Spannung hat eine parallele $\sigma_{||}$ und eine senkrechte Komponente $\sigma_{\perp}$. Der Zusammenhang zwischen der relativen Änderung des Widerstandes r (in der Literatur auch mit d bezeichnet) und den beiden Spannungen kann wie folgt beschrieben werden.

$$r := dR/R = d\rho/\rho = \pi_{||}\,\sigma_{||} + \pi_{\perp}\,\sigma_{\perp} \qquad \text{(Gl. 1)}$$

wobei $\pi_{||}$ und $\pi_{\perp}$ die parallelen und senkrechten piezoelektrischen Koeffizienten sind.

Für die häufigst vorkommende <110>-Richtung der Membrane ergibt sich

$$\pi_{||} = 1/2\,(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$$
$$\pi_{\perp} = 1/2\,(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})$$

ein \ aus	Strahlung	mechanisch	thermisch	elektrisch	magnetisch	chemisch
Strahlung	Photolumineszenz	Strahlungsdruck	Strahlungsheizung	Photoleitfähigkeit	Photomagnetismus	photochemisch
mechanisch	photoelastischer Effekt	Impulserhaltung	Reibungswärme	Piezoelektrizität	Magnetostriktion	druckinduzierte Explosion
thermisch	Weissglühen	thermische Ausdehnung	Wärmeleitung	Seebeckeffekt	Curie-Weiss-Gesetz	endothermische Reaktion
elektrisch	Lumineszenz durch induzierte Elektronen	Piezoelektrizität	Peltiereffekt	Mosfet	Gesetz von Ampère	Elektrolyse
magnetisch	Faradayeffekt	Magnetostriktion	Ettinghausen-effekt	Halleffekt	magnetische Induktion	
chemisch	Chemo-lumineszenz	Explosions-reaktion	exothermische Reaktion	Voltaeffekt		chemische Reaktion

Tabelle I Effekte für die Signal- oder Energieumwandlung nach Middelhoek [4]

Für p-Typ-Si
$p11 = +6{,}6 \cdot 10^{-11}\ Pa^{-1}$
$\pi_{12} = -1{,}1 \cdot 10^{-11}\ Pa^{-1}$
$\pi_{44} = +138{,}1 \cdot 10^{-11}\ Pa^{-1}$

Vorteile von Siliziumdrucksensoren:
- Der K-Faktor ist fast hundertmal grösser als in metallischen Dehnungsmessstreifen.
- Silizium ist als einkristallines Material hysteresefrei.
- Da der Piezowiderstand Teil des einkristallinen Materials ist, gibt es keine zusätzlichen Verbindungsprobleme wie beim Kleben.
- Die Widerstände sind automatisch dort, wo die mechanische Spannung am grössten ist, nämlich an der Oberfläche.
- Abgeglichene Widerstände sind möglich, da sie gleichzeitig hergestellt werden.
- Miniaturisierung und Massenfabrikation sind der Technologie inhärent.
- Weitere Widerstände (z.B. für Temperaturkompensation) und eventuell sogar Kompensationselektronik können mit derselben Technologie dazugebaut werden.

Empfindlichkeit

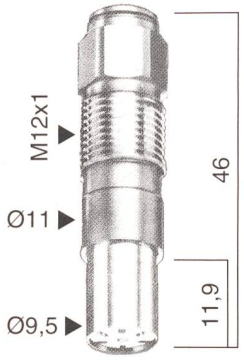
Die Empfindlichkeit S eines piezoresistiven Drucksensors ist definiert als Spannung ΔU in mV, gemessen bei einem auf die Membrane wirkenden Differenzdruck Δp von 1 bar und bei einer an der Brücke angelegten Versorgungsspannung von $U_0 = 1$ V.

$$S_v = \frac{\Delta U}{U_o \Delta p} = \frac{\Delta R}{R_o \Delta p} = \frac{1}{2\Delta p}\pi_{44}(\sigma_{||} - \sigma_{\perp}) \qquad \text{(Gl. 2)}$$

Diese Empfindlichkeit liegt bei typischen Drucksensoren, die einen Messbereich bis 1 bar haben, bei $S^* = 10$ mV $V^{-1}bar^{-1}$. Der Durchmesser der Membrane beträgt typischerweise etwa 1 mm und deren Dicke etwa 15 µm. Die Spezifikationen eines käuflichen Sensors sind aus Bild 4 zu ersehen.

Physikalische Sensortypen

Darunter fallen im wesentlichen Detektoren für Strahlung, Wärme, Teilchen, Energie. Beispielsweise sind Bolometer Strahlendetektoren, welche auf dem Prinzip der Wärmemessung beruhen. Es geht also darum, die durch Strahlung induzierte Temperaturänderung eines möglichst wärmeisolierten Körpers zu messen. Neben den fabrikationstechnischen Vorteilen bietet Silizium eine geringe Wärmekapazität (für eine hohe Sensitivität) und eine hohe Wärmeleitfähigkeit (für eine kurze Antwortzeit). Bild 5 zeigt die Realisierung eines solchen Bolometers [5]. Aus einem Siliziumstück wurde, nachdem Widerstände als Temperatursensoren (Thermistoren) eindiffundiert worden waren, eine Insel herausgeätzt, welche nur über dünne Arme mit dem Rest des Chips verbunden ist.



4075A10

- Piezoresistiver Absolut-Druckaufnehmer
- Geeignet zur Druckmessung in der Ladungswechselindizierung und bei der Untersuchung von Aufladeverfahren

Technische Daten		
Bereich	bar	0...10
Kal. Teilbereiche	bar	–
Empfindlichkeit	pC/bar	–
	mV/bar	50
Eigenfrequenz	kHz	45
Linearität	% FSO	≦±0,3
Beschleunigungsempfindlichkeit	bar/g	< 0,0003
Betriebstemperaturbereich Aufnehmer	°C	20...120
Therm. Empfindlichkeitsänderung	20...100 °C %	≦±1
	20...350 °C %	–
	150...250 °C %	–
Datenblatt No.		3.032

Bild 4 Piezoelektrischer (Silizium-)Druckaufnehmer der Firma Kistler

Chemische Sensortypen

Chemische Sensoren dienen zur Messung der Konzentration eines in Gas oder Flüssigkeit gelösten Stoffes. Die Sensoren funktionieren meist zweistufig: zuerst chemisch-physikalisch, dann physikalisch-elektrisch.

Änderung der Leitfähigkeit: Beispielsweise von Metalloxid-Halbleitern für CO, wobei der Sauerstoff als Akzeptor funktioniert und damit in der Gegenwart von oxidierenden oder reduzierenden Gasen die Leitfähigkeit ändert.

Thermische Sensoren: Diese messen die Wärmeaufnahme oder -abgabe bei katalytischen Reaktionen.

Masseänderung: Adsorption von chemischen Substanzen, gemessen beispielsweise als Resonanzfrequenzänderung.

Änderung der Dielektrizitätskonstante von Polymerfilmen, beispielsweise von interdigitalen (fingerähnlichen) kapazitiven Strukturen als Feuchtigkeitssensoren.

Optische Wellenleiter: Änderung der Absorption oder des Brechungsindexes durch Veränderungen an einer chemisch sensiblen Schicht.

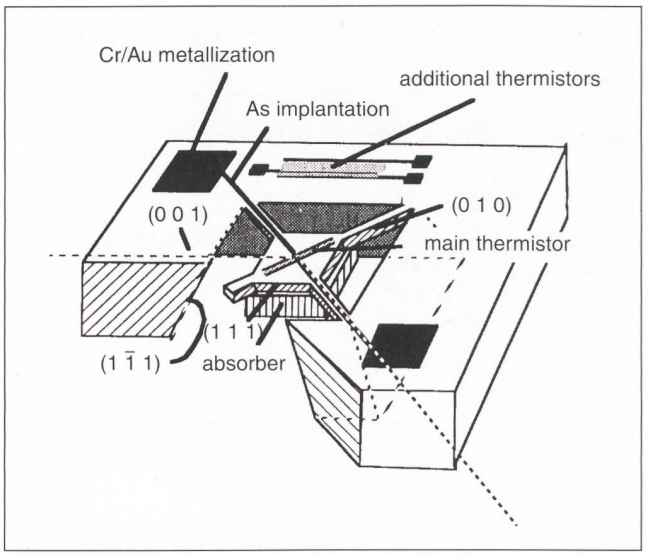


Bild 5 Bolometer

Potentialänderung an einer Grenzschicht (Bild 6): In Frage kommen ein ISFET oder eine elektrochemische Zelle. Beim ISFET (Ion Sensitive Field Effect Transistor) wird das beim FET übliche Gate durch Lösung und die Referenzelektrode (6) ersetzt. Abhängig vom pH-Wert, das heisst von der Protonenkonzentration in der Lösung (7), ändert sich das Potential über dem Kanal und damit wie beim FET die Leitfähigkeit zwischen Source (1) und Drain (2).

Der Anwendungsbereich chemischer Sensoren reicht von der Reaktorregelung über die Sicherheitstechnik bis zu biologischen, medizinischen oder umwelttechnischen Systemen.

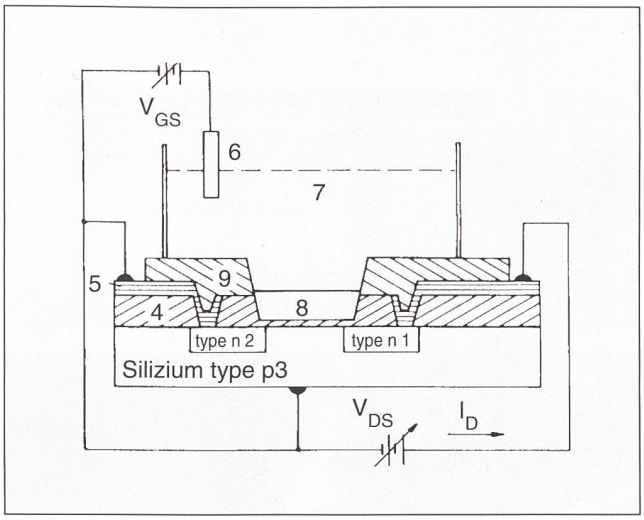


Bild 6 Ion Sensitive Field Effect Transistor (ISFET)

Aktoren

Aktoren (actuators) sind die Verbindungsglieder zwischen dem informationsverarbeitenden Teil von elektrischen Steuerungen und einem technischen oder nichttechnischen, zum Beispiel biologischen, Prozess [6]. Mit Hilfe von Aktoren lassen sich Energieflüsse oder Massen- bzw. Volumenströme zielgerichtet beeinflussen. Der Aktoreingang wird möglichst mit mikroelektronikkompatiblen Strömen und Spannungen angesteuert. Dies unterscheidet sie von den uns vertrauteren Stellgliedern. Ausgangsgrösse ist häufig die mechanische Arbeit (Kraft × Weg) oder auch nur Weg wie zum Beispiel bei Ablenkungseinheiten für Lichtstrahlen.

Aktuationsmechanismen

Die folgende Tensor-Gleichung beschreibt verschiedene Möglichkeiten der direkten Energieumwandlung, welche eine Materialdehnung (Verzerrung) ${}^2\varepsilon$ [7] zur Folge haben

$$ {}^2\varepsilon = {}^2\alpha\ \Delta T + {}^3\boldsymbol{d}^T \cdot \boldsymbol{E} + {}^3\boldsymbol{q}^T \cdot \boldsymbol{H} + {}^4\boldsymbol{s} \cdot {}^2\sigma \qquad \text{(Gl. 3)} $$

wobei der erste Term die thermische Energieumwandlung, der zweite die piezoelektrische, der dritte die magnetostriktive und der letzte Term die direkte mechanische Deformation bezeichnet. Die hochgesetzten Zahlen geben die Stufe, das hochgesetzte T eine Transposition der Tensoren an. Die Effekte höherer Ordnung sind oft klein und daher verdeckt durch die in der Gleichung berücksichtigten Terme. Als Kräfte, welche von einem äusseren System auf den Aktuator ausgeübt werden, sind zu nennen:

1. Elektrostatische Kräfte: gegeben durch den Gradienten der Energie des elektrostatischen Feldes

$$ F_i = \frac{\partial W}{\partial x_i} \qquad \text{(Gl. 4)} $$

mit

$$ W_{el} = \frac{1}{2} \int \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{D}\, dV \qquad \text{(Gl. 5)} $$

als der Energie des elektrostatischen Feldes (in SI-Einheiten) bei linearem Materialverhalten. Für eine Miniaturisierung ist somit der Gradient der Energiedichte entscheidend.

Für einen Plattenkondensator gilt

$$ W_{el} = \frac{1}{2} \int \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{D}\, dV = \frac{1}{2} \boldsymbol{E} \cdot \varepsilon \boldsymbol{E} \int dV = \frac{1}{2} \varepsilon \left(\frac{U}{x} \right)^2 A \cdot x = \frac{\varepsilon U^2 A}{2x} \qquad \text{(Gl. 6)} $$

wobei $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ die Dielektrizitätskonstante, A die Fläche der Platte, U die Spannung und x den Plattenabstand bezeichnet. Damit ergibt sich für die Kraft in Richtung der gegenüberliegenden Platte eine Kraft von

$$ F(x) = \frac{\varepsilon U^2 A}{2x^2} \qquad \text{(Gl. 7)} $$

Diese Art der Aktuierung ist in der Mikromechanik besonders beliebt, weil sie an kein besonderes Material gebunden ist, leicht zu implementieren ist und weil zudem, wie die Formel für die Kraft zeigt, bei einer Skalierung die Kraftdichte zunimmt.

Nachteilig ist die stark nichtlineare Abhängigkeit der Kraft vom Weg. Ein elektrostatischer Aktuator besteht im Prinzip im-

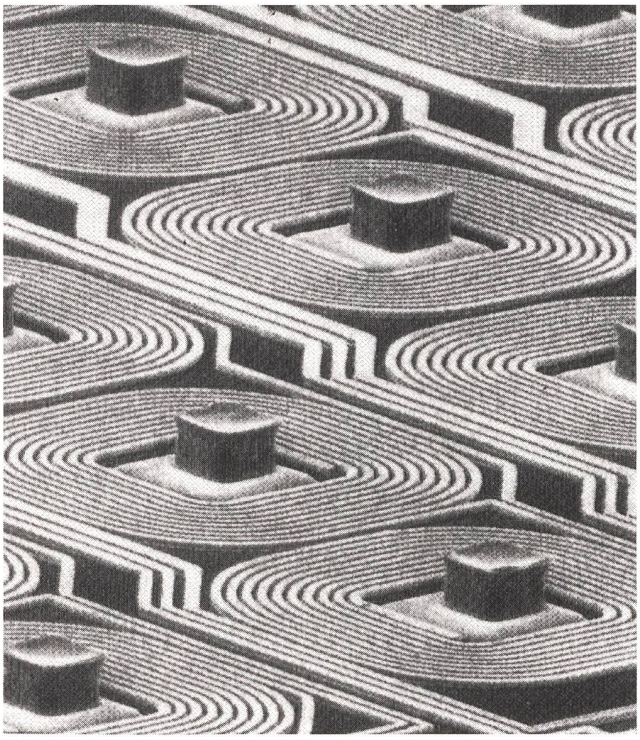


Bild 7 Um Permalloykerne gelegte Mikrospulen [8]

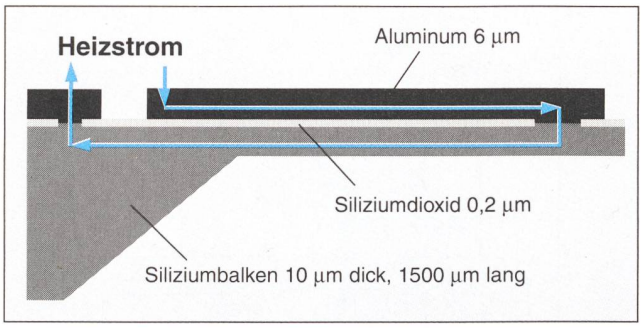


Bild 8 Aufbau des Greiferfingers

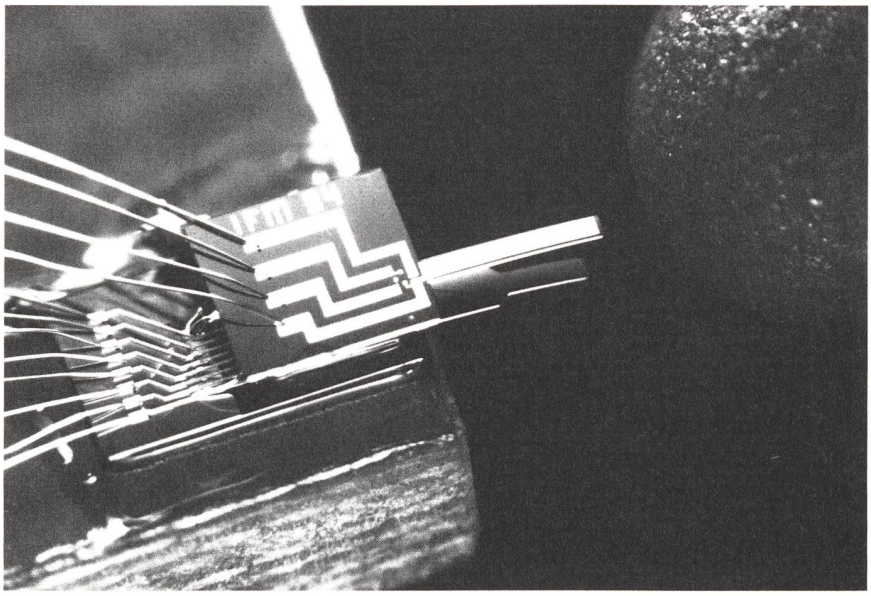


Bild 9 Bimorpher Mikrogreifer [9]

mer aus zwei Elektroden, die mit einer Feder ausserhalb des Kondensators verbunden sind. Meist ist die eine Elektrode selbst die Feder, sei es als Balken oder als Membrane. Wenn der Kraftgradient des elektrostatischen Feldes grösser ist als die Federkonstante (gleich Gradient der Federkraft), klappt der Kondensator zusammen.

2. *Magnetostatische Kräfte:* Die Energie des magnetostatischen Feldes sieht bei linearem Materialverhalten formal analog zum elektrostatischen Feld aus:

$$W = \frac{1}{2}\int \boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{H}\,dV \qquad \text{(Gl. 8)}$$

Der Nachteil ist, dass die Permanentmagneten oft sehr gross und nicht langzeitstabil sind. Die Erzeugung von magnetischen Feldern durch miniaturisierte Elektromagnete ist möglich (Bild 7), aber limitiert durch Dissipation von Wärme.

3. *Elektrodynamische Kraft (Lorentz-Kraft):* Diese lässt sich wie folgt anschreiben:

$$F = q(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}) \qquad \text{(Gl. 9)}$$

bzw. für eine Stromdichte $\boldsymbol{j}$

$$F = \int \boldsymbol{j}(\boldsymbol{r})\times\boldsymbol{B}(\boldsymbol{r})\,dV \qquad \text{(Gl. 10)}$$

Andere Arten der direkten Aktuierung sind die Magnetostriktion (von hauptsächlich auf Nickel basierenden Werkstoffen), Memory Shape Alloys, elektrochemische oder pneumatische Prinzipien (Ausdehnung eines Volumens, beispielsweise durch Heizen oder eine chemische Reaktion).

Beispiel eines Aktors

Der Greifer in Bild 8 ist nach dem Bimetallprinzip aufgebaut: zwei aufeinander geheftete Materialien mit unterschiedlichem thermischem Ausdehnungskoeffizienten erzeugen bei einer Temperaturänderung eine im wesentlichen positionsunabhängige Kraft. Dies wird erreicht, indem Aluminium auf einen Siliziumbalken aufgedampft wird, wobei eine dünne Oxidschicht die beiden Materialien elektrisch so voneinander isoliert, dass man die Anordnung direkt mit einem Strom beheizen kann.

(Teile 2 und 3 folgen in Bulletin Nr. 21 und 25/95)

Literatur

[1] *L. Y. Lin* et al.: Micromachined Integrated Optics for Free-Space Interconnections. IEEE Workshop on MEMS 1995, Amsterdam, p. 77.

[2] *K. Murakami, H. Muro, H. Nojiri, M. Nakamura:* Development of semiconductor integrated sensors for automotive application. Programme – 18th Int. Symposium on Automotive Technology and Automation, 88076/1-17, 2(1988), 30 May to 3 June, Florence, Italy.

[3] *M. H. Westbrook:* Future developments in automotive sensors and their system. J. Phys. E. Sci Instrument, UK, 22(1989)9, pp. 693–699.

[4] *S. Middelhoek* and *S. A. Audet:* Silicon sensors. Academic Press, cop., London (etc.), (1989), p. 5.

[5] *G. A. Racine, R. A. Buser, N. F. de Rooij:* Low Temperature Operating Silicon Bolometers for Nuclear Radiation Detection. Sensors and Actuators A21–A23 (1990), pp. 478–481.

[6] *H. Janocha:* Aktoren: Grundlagen und Anwendungen. Berlin etc., Springer, cop., (1992), p. 1.

[7] *P. Pauffler:* Physikalische Kristallographie. VCH-Verlagsgesellschaft, D-6940 Weinheim. ISBN 3-527-26454-X, 1986.

[8] *F. Cardot* et al.: Microfabrication of High density Arrays of Microelectromagnets with on Chip Electronics. Digest of the 7th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Transducers 93, Yokohama, June 7–10, 1993, p. 32.

[9] *G. Greitmann, R. A. Buser:* Tactile Microgripper for Automated handling of Microparts. Digest of Technical Papers. The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Transducers 95 Eurosensors IX, Stockholm, Sweden, June 25–29, 1995, p. 372.

Les microsystèmes – une technologie d'avenir

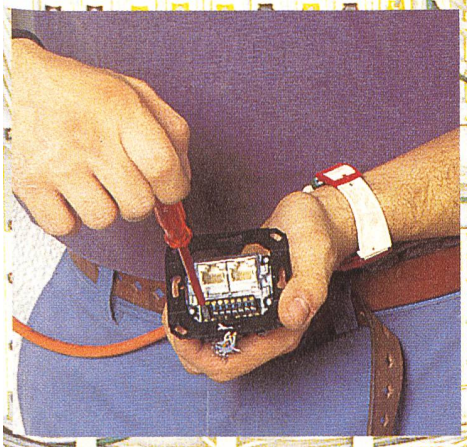
1re partie: Bases

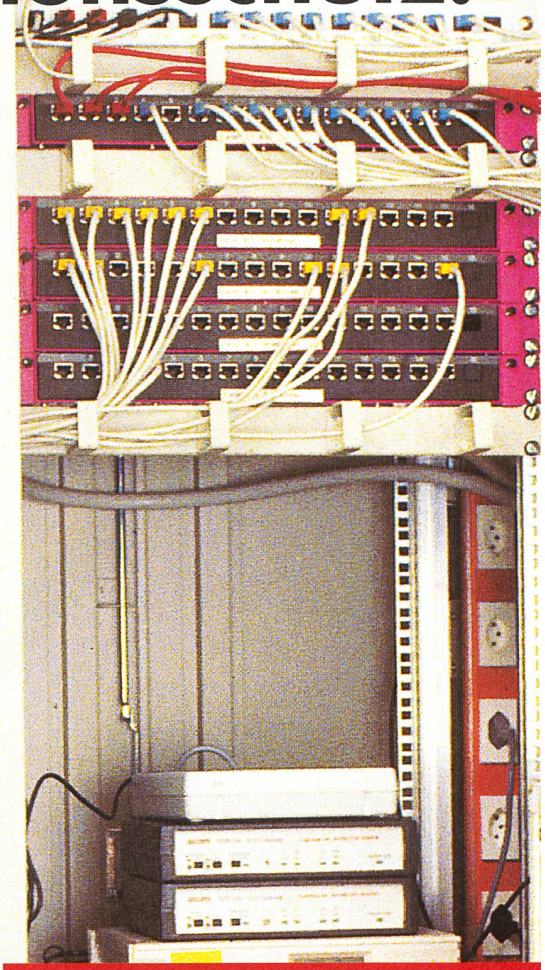
L'article donne un aperçu des possibilités de la technique des microsystèmes dans l'industrie et la recherche. Quelques considérations de base et des exemples sélectionnés serviront au lecteur d'introduction. Cette première partie explique de quoi il s'agit et expose les origines et l'évolution de la technique des microsystèmes. Une deuxième partie approfondira les aspects systèmes et montrera avec des exemples où résident les problèmes et où la technique en est actuellement. Une troisième partie donnera un aperçu des technologies de fabrication.

Alle sprechen über NEXT und Dämpfung – wir über EMV-Smog und Investitionsschutz.

What's next nach NEXT?
In der universellen Gebäudeverkabelung werden passive Installationen aus wirtschaftlichen Gründen für eine längere Einsatzzeit erstellt. Die verwendeten Komponenten sind deshalb zukunftssicher auszulegen und müssen auch im konstant zunehmenden EMV-Smog den Anforderungen entsprechen. Die kompetente Umsetzung physikalischer Erkenntnisse am Produkt sowie eine konsequent durchgehende Abschirmung der Übertragungsstrecke mit Erdungskonzept geben die Gewähr für einen störungsfreien Betrieb der künftigen empfindlichen Dienste. Unsere langjährige Zusammenarbeit mit einem engen Netz von Übertragungs- und EMV-Spezialisten bringt Ihnen Sicherheit. Unsere Produkte sind klar strukturiert und ergeben transparente Systemlösungen mit wenig Zubehör. Sie entsprechen den internationalen Normen ISO/IEC 11801 bzw. EN 50173 in allen übertragungs-und schirmungstechnischen Belangen. Inbegriffen sind auch benutzerfreundliche 45°-Neigung der Steckrichtung, einfache Installation und universelle Auslegung für alle geschirmten Kabel.

INELTEC 95:
Halle 115, Stand B42





Übertrifft 100 MHz Kat. 5 Link D, SEV geprüft und zertifiziert, geeignet für 155 Mbit/sec.!

Bei Egli, Fischer erhalten Sie Beratung, Projektbegleitung und ein breites Sortiment an passiven und aktiven Komponenten für die universelle Gebäudeverkabelung, alles aus einer Hand:

- Datenkabel Kupfer und Glas
- Datenstecker Kupfer und Glas
- Datendosen Kupfer und Glas
- Patch-Kabel Kupfer und Glas
- Patch-Panel Kupfer und Glas
- Datenschränke 19"-Technik
- Aktive Komponenten Kupfer und Glas

Egli Fischer Zürich

Egli, Fischer & Co. AG, Networks / Fiber-Optics
Gotthardstrasse 6, 8022 Zürich
Telefon 01/209 33 18, Fax 01/201 22 75

N295

Kundennähe

OTTIGER & PARTNER BSW

ineltec 95
29.8.-1.9.1995
Halle 115, Stand F40

Niederspannungs-Schaltanlagen stellt der Anlagenbauer auftragsspezifisch und kundennah her, wobei ihm Weber als Lieferant von Komponenten, Geräten und Systemen auch mit entsprechendem Support zur Seite steht. Wir sind vertraut mit den Problemstellungen des Anlagenbauers – mit unseren Lösungen für Schränke, Sammelschienensysteme, Ein- und Abgangsfelder, Schalter und Sicherungen sowie typgeprüfte Schaltgerätekombinationen.
Wir sind nahe bei Ihnen mit unserem regionalen Aussendienst und unserem schnellen, leistungsfähigen Lieferservice.

WEBER

Schalten Sie den Weber ein:
Telefon 041 50 70 00 Fax 041 50 72 97

Elektronischer Universal-Drehstromzähler

Enermet – führender Hersteller statischer Elektrizitätszähler – präsentiert die Serie 400 für den Schweizer Markt.

INELTEC '95
Halle 102
Stand C 33

Diese Zähler sind lieferbar für: 1 oder 2 Tarife, Direkt- oder Messwandleranschluss, Wirk- oder Blindverbrauch, Klasse 2 oder Klasse 1. Sie sind mit S0-Schnittstelle ausgerüstet und geeignet für Anwendungen vom Haushalt bis zur Industrie.

ENERMET

ENERMET-ZELLWEGER ENERGIETECHNIK AG
UNDERMÜLISTRASSE 28, Tel. 01 954 81 11
CH-8320 FEHRALTORF, Fax 01 954 82 01

✂----------

Ich möchte gerne alle Vorteile der Enermet-Serie 400 kennenlernen. Bitte informieren Sie mich im Detail.

Name _____ Firma _____

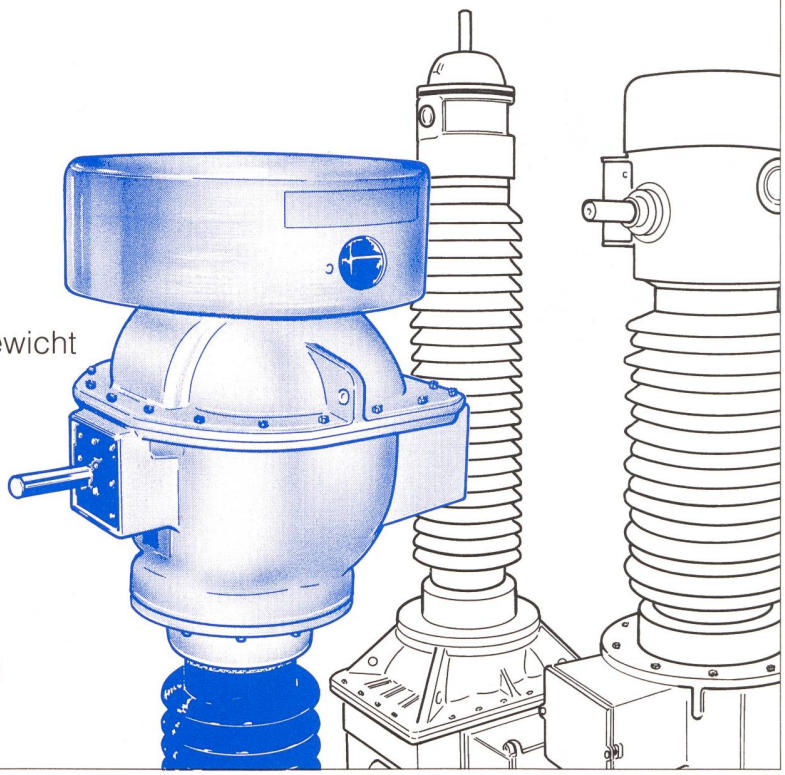
Strasse _____ PLZ/Ort _____

PFIFFNER

Freiluftwandler
36 kV bis 145 kV

Ihr Vorteil, unsere Verpflichtung:

- beste Qualität
- hohe Betriebssicherheit
- minimale Abmessungen und Gewicht
- kompetente Beratung
- spezifische Lösungen



EMIL PFIFFNER & CO. AG
CH-5042 HIRSCHTHAL
TEL. ..41 64 80 11 80 FAX ..41 64 81 12 52
AB 5. NOV. 1995
TEL. ..41 62 739 28 28 FAX ..41 62 739 28 10

RECOMA PERMANENT-MAGNETE

UGIMAG AG

Entwicklung, Fertigung und Vertrieb von Seltenerd-Kobaltmagneten sowie mit solchen Magneten versehenen Systemen.

Recoma®

Magnete aus Seltenen Erden und Kobalt. Grösstmöglicher Energieinhalt, höchste Widerstandsfähigkeit gegen Entmagnetisierung.

Anwendungsbeispiele von Recoma

Magnet-Kupplung zum berührungslosen Übertragen von Drehmomenten in Autoklaven und Pumpen. Motoren. Sonstige Magnetsysteme.

UGIMAG

England:

UGIMAG Ltd
The Ickles
Sheffield Road
ROTHERHAM
SOUTH YORKSHIRE - S60 1DP

Phone: (0709) 829 783
Telefax: (0709) 371 506

Schweiz:

UGIMAG AG
Industriestrasse 297
5242 Lupfig

Telefon: (056) 94 90 66
Telefax: (056) 94 90 81
ab 4.11.95:
Telefon: (056) 444 90 66
Telefax: (056) 444 90 81

Deutschland:

Deutsche Carbone AG
GE-Magnete
Talstrasse 112
60437 Frankfurt a.M.

Telefon: (069) 500 92 36
Telefax: (069) 500 92 38
Telex: 041 1010 carb d