

Hand der Technik, Essen

13. bis 14. 2. 1996

Mikrotechnik im Automobil - eine Einschätzung des Potentials

S. Büttgenbach

Institut für Mikrotechnik, Technische Universität Braunschweig,
Langer Kamp 8, D-38106 Braunschweig

Inhalt: Entwicklung der Mikrotechnik, Mikrotechnologien, Entwurf mikrotechnischer Komponenten, Anwendungspotential der Mikrotechnik im Automobil, aktuelle Anwendung von Mikrosensoren, Entwicklungstrends bei Mikrosensoren, Einsatz von Mikroaktoren

Zusammenfassung: Die Anforderungen bezüglich Umweltfreundlichkeit, Sicherheit und Komfort treiben den Einsatz mikrotechnischer Komponenten, insbesondere von Mikrosensoren, im Automobil voran. Durch die im Automobilbau zu erwartenden hohen Stückzahlen ist eine kostengünstige Fertigung absehbar.

Mikrotechnik im Automobil - eine Einschätzung des Potentials^{*)}

S. Büttgenbach

Institut für Mikrotechnik, Technische Universität Braunschweig,
Langer Kamp 8, D-38106 Braunschweig

1. Einleitung

Die Entwicklung der Mikroelektronik in den letzten drei Jahrzehnten hat zu einer außerordentlichen Steigerung der Komplexität und der Leistungsfähigkeit integrierter Schaltungen geführt bei gleichzeitiger Reduktion der Strukturgrößen, der Leistungsaufnahme und des Preises (Bild 1).

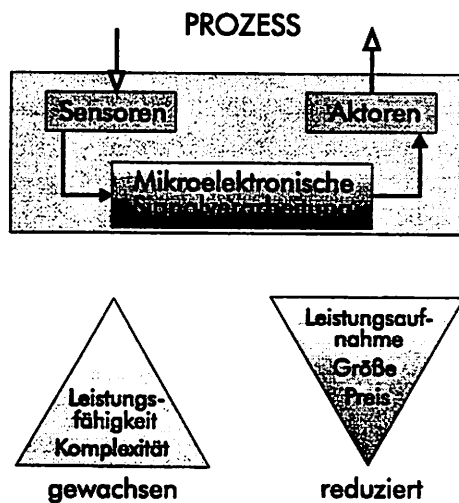


Bild 1. Mikroelektronik und Mikro-technik

Diese Entwicklung hat dazu geführt, daß in vielen Bereichen der Technik mechanische durch elektronische Funktionen ersetzt wurden. Ein typisches Beispiel aus der Kraftfahrzeugtechnik ist der Ersatz der mechanischen Einspritzpumpe durch eine elektronische Einspritzsteuerung. Für das weitere Vordringen der Mikroelektronik in neue Anwendungsgebiete ist bei den Elementen zur Anbindung der mikroelektronischen Signalverarbeitung an die Umwelt - Sensoren und Aktoren - ebenfalls ein Entwicklungsschub bezüglich Integrationsgrad und Miniaturisierung notwendig. Da-

mit entstehen komplexe, multifunktionale Mikrosysteme, die durch die Kombination von Sensoren, Aktoren und Signalverarbeitung auf engstem Raum völlig neue Leistungsmerkmale eröffnen und entscheidende Vorteile gegenüber herkömmlichen Systemen besitzen, wie hohe Funktionsdichte, kleines Volumen und niedriges Gewicht, geringe Leistungsaufnahme, hohe Zuverlässigkeit und Sicherheit vor einem 'Reverse Engineering'.

2. Mikrotechnologien

Die Mikrotechnik geht von den hochentwickelten Fertigungsverfahren der Mikroelektronik aus. Diese Verfahren sind gekennzeichnet durch die Erzeugung von Strukturen mittels Lithographie. Mit Hilfe von Licht, in speziellen Fällen von Röntgenstrahlung oder Elektronen, werden die Mikrostrukturen zunächst in einem strahlungsempfindlichen Material, dem Resist, erzeugt. Im Anschluß an die Entwicklung wird diese Struktur auf das darunter liegende Werkstück, das Substrat, übertragen. Dies geschieht durch Ätzen, durch Beschichten oder durch eine Veränderung der Eigenschaften oberflächennaher Schichten, z.B. durch Dotieren. Nach der Übertragung auf das Substrat wird das Resist, das die nicht zu bearbeitenden Partien des Substrats geschützt hat, abgelöst. Ein weiterer Vorteil für Massenmärkte wie den Automobilbau ist die Möglichkeit der kostengünstigen Produktion durch gleichzeitige Fertigung sehr vieler Bauelemente (Batch-Verfahren).

Bei mikrotechnischen Komponenten und Systemen sind im Gegensatz zur Planartechnik der Mikroelektronik auch dreidimensionale und bewegliche Mikrostrukturen herzustellen. Dies bedeutet, daß zu den Grundprozessen, die von der Mikroelektronik übernommen werden, mikrotechnik-spezifische Prozesse hinzukommen müssen [1]. Beispiele dafür sind Prozesse, die zur Herstellung mechanischer Mikrostrukturen angewendet werden. Man unterscheidet heute im wesentlichen drei Mikromechanik-Technologien:

Die Bulk-Mikromechanik wendet vorwiegend die anisotrope und selektive Tiefenätztechnik zur dreidimensionalen Strukturierung an. Als Sub-

^{*)} Vortrag auf der Tagung "Mikrotechnik im Automobilbau" am 13. und 14. Februar 1996, Haus der Technik e.V., Essen

stratmaterial wird meistens Silizium verwendet, sowohl wegen seiner sehr guten mechanischen und elektrischen Eigenschaften als auch wegen der Tatsache, daß die Bearbeitungsverfahren der Mikroelektronik vorzugsweise für dieses Material entwickelt wurden. Aber auch andere einkristalline Materialien wie zum Beispiel Quarz kommen zum Einsatz.

Die Oberflächen-Mikromechanik geht - ähnlich der Planartechnik der Mikroelektronik - aus von Sandwichstrukturen dünner Schichten, zum Beispiel aus Siliziumdioxid und polykristallinem Silizium, die auf die Oberfläche des Substrats aufgebracht werden. Nach der Strukturierung der Schichten wird das Oxid vollständig herausgeätzt, so daß frei bewegliche Strukturen aus Polysilizium entstehen.

Zur Herstellung von Mikrostrukturen mit hohen Aspektverhältnissen aus Metallen und Kunststoffen werden zunächst durch Tiefenlithographie Mikrostrukturen in einer entsprechend dicken Resistschicht (einige 100 µm) erzeugt. Bei dem bekanntesten dieser Verfahren, dem LIGA-Verfahren, benutzt man kurzwellige Röntgenstrahlung und PMMA als Resistmaterial. Durch galvanische Abscheidung von Metall in diese Resiststrukturen entstehen Metallstrukturen mit entsprechenden Aspektverhältnissen, die als Formeinsatz zur Abformung mit Kunststoffen genutzt werden.

Ergänzt werden diese Technologien durch Strukturierungsverfahren, die mit formgebenden Werkzeugen arbeiten, z.B. Abtragen mit einem Laserstrahl. Damit hat man die Möglichkeit, nahezu beliebige Formen aus dem Substrat herauszuarbeiten.

Für die Fertigung mikroelektronischer Bauelemente stehen leistungsfähige Dünnschichttechniken einschließlich der zugehörigen Strukturierungsverfahren zur Verfügung, die in modifizierter Form auch in der Mikromechanik eingesetzt werden können. Die Mehrzahl der bei mikromechanischen Komponenten benötigten funktionalen Schichtsysteme mit maßgeschneiderten Eigenschaften sind jedoch neu zu entwickeln. Dazu gehören Schichten zur Krafterzeugung ebenso wie sensitive Schichten, tribologische Schichten und epitaktische III/V-Halbleiterschichtsysteme für optoelektronische Anwendungen.

3. Mikromechanik-Entwurf

Aufgrund ihrer unterschiedlichen Zielsetzung genügen die aus der Mikroelektronik bekannten Entwurfsmethoden nicht den Anforderungen, die in der Mikromechanik gestellt werden. Um die Entwicklung mikromechanischer Bauelemente dennoch wirtschaftlich durchführen zu können, ist

die Entwicklung neuer rechnergestützter Werkzeuge notwendig.

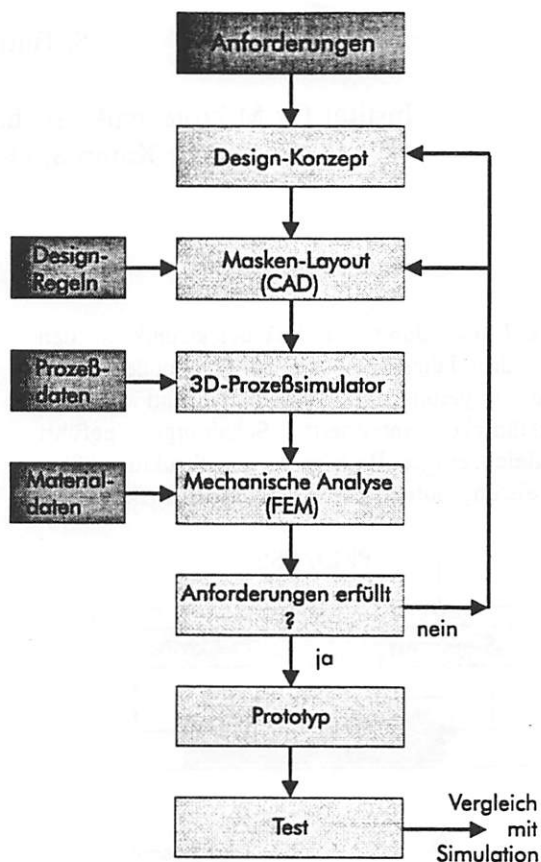


Bild 2. Schematische Darstellung der Entwicklungsschritte eines mikromechanischen Bauelementes

Die Entwicklung mikromechanischer Strukturen auf der Basis der Bulk-Siliziummikromechanik (Bild 2) geht von den Anforderungen an das Bauelement (Funktionsdefinition, Spezifikation) aus und leitet daraus einen mikromechanischen Strukturvorschlag (Design-Konzept) ab. Dieser Schritt verlangt vom Entwickler ein hohes Maß an Kreativität und Intuition, da hierfür derzeit keine rechnergestützten Verfahren zur Verfügung stehen.

Als nächster Schritt erfolgt die Umsetzung der mikromechanischen Struktur in ein Masken-Layout. Dabei werden die Daten der dreidimensionalen Struktur reduziert auf eine zweidimensionale Projektion in die einzelnen Maskenebenen. Bisher existiert keine umfassende Darstellung in Form einer Bibliothek, die es erlaubt, nach Vorgabe einer funktionellen mikromechanischen Struktur die zu ihrer Herstellung notwendigen Design-Regeln in ein Masken-Layout einzubeziehen. Meist wird der umgekehrte Weg beschritten, d.h. man geht von einem Masken-Layout aus und leitet daraus durch Prozeßsimulation die dreidi-

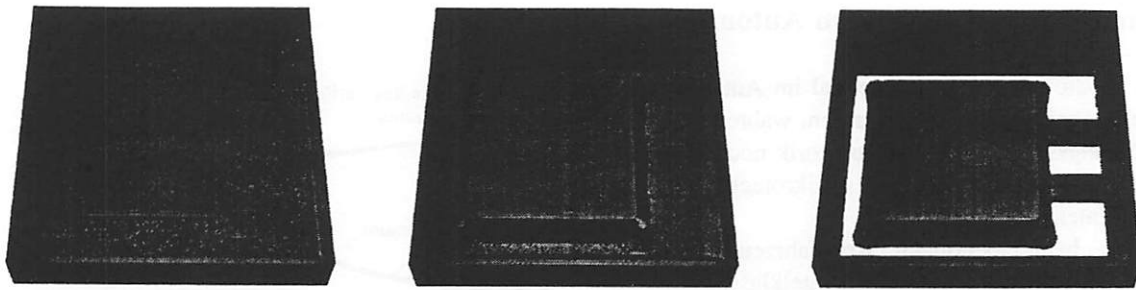


Bild 3. Ätzsimulation eines mikromechanischen Beschleunigungssensors [2]

mensionale Struktur ab. Danach ist im allgemeinen ein Redesign und eine erneute Simulation notwendig. Dieses Verfahren kann durch die Erarbeitung von Dimensionierungsregeln für die Geometrie der Ätzmaske und von Technologie-Regeln, die die Kompatibilität des Ätzschrittes mit anderen Prozessschritten garantieren, vereinfacht werden.

Neben der üblichen Prozesssimulation, z.B. für Schichtwachstum oder Dotierprofile, werden zur Simulation mikromechanischer Strukturen Programme benötigt, mit denen man aus der Struktur der planaren Maske die Form der anisotrop geätzten dreidimensionalen Struktur ableiten kann. Ein Simulator für das naßchemische anisotrope Tiefenätzen von Silizium sollte sowohl die Abhängigkeit des Ätzvorgangs von der chemischen Zusammensetzung und der Temperatur des Ätzmittels berücksichtigen, wie auch die Möglichkeit zur Modellierung von Ätzstopptechniken beinhalten. Ein Ätzsimulator, der diese Voraussetzungen erfüllt, ist das Programm SUZANA [2].

Bild 3 zeigt als Beispiel die Ätzsimulation eines Beschleunigungssensors mit kapazitiver Si-

gnalauslesung. Die an zwei hochbordotierten Siliziumstegen aufgehängte seismische Masse wird durch anisotropes, selektives Ätzen von Wafervor- und Rückseite unter Anwendung einer Maskenkompensationstechnik hergestellt. Die seismische Masse wird als bewegliche Mittelelektrode zwischen zwei Siliziumscheiben mit festen Elektroden gebondet. Eine Beschleunigung bewirkt eine Auslenkung der Mittelplatte, die eine Änderung der Kapazitäten der beiden von Mittelplatte und Gegenelektroden gebildeten Kondensatoren zur Folge hat. Mit Hilfe elektrostatischer Kräfte ist die Erweiterung zu einem kraftkompensierten System möglich.

Die Optimierung einer mikromechanischen Struktur geschieht iterativ durch Berechnung ihres mechanischen Verhaltens mit Hilfe der Methode der finiten Elemente (FEM) und Vergleich der Ergebnisse mit den Anforderungen. Im Anschluß an den prozeßgerechten und bezüglich der Anforderungen optimierten Entwurf erfolgt die Herstellung von Prototypen des Bauelements.

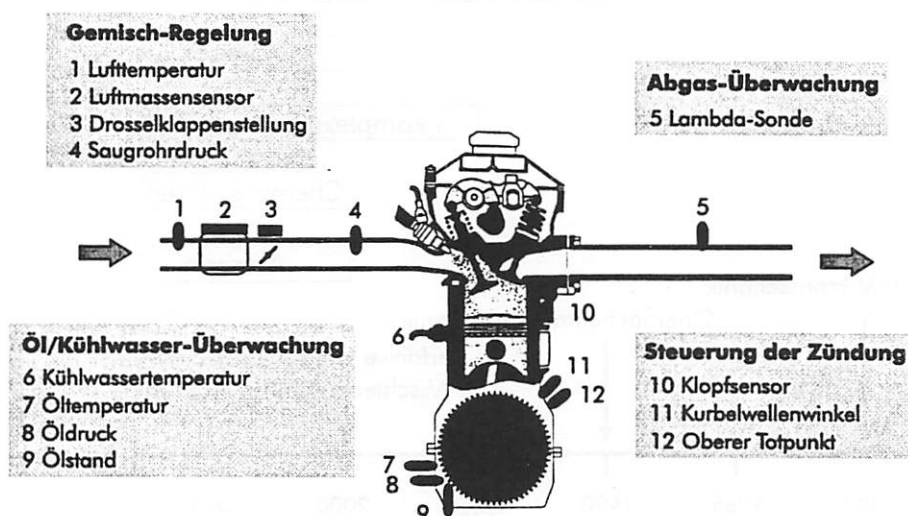


Bild 4. Sensoren für die Motorsteuerung [3]

4. Anwendungspotential im Automobil

Das größte Anwendungspotential im Automobil besitzen gegenwärtig Mikrosensoren, während der Entwicklungsstand in der Mikroaktorik noch keine Großserienfertigung aktiver mikrotechnischer Komponenten erlaubt.

Bereits heute benötigen Kraftfahrzeuge eine Vielzahl von Sensoren; in Mittelklassewagen dienen z.B. alleine zwölf Basissensoren zur Motorsteuerung (Bild 4). Steigende Anforderungen an Umweltfreundlichkeit, Sicherheit und Komfort führen zu zusätzlichen Funktionen wie Fahrdynamikregelungen, Getriebesteuerungen, Navigations- und Radarsysteme, Standheizungen, Motormanagementsysteme und Sensoren zur Einpark- und Abbiegeassistenten. Der verfügbare Bauraum im Fahrzeug wird zukünftig jedoch kaum größer werden, d.h. der zur Verfügung stehende Bauraum muß wesentlich funktionsdichter genutzt werden, woraus sich der Zwang zur Miniaturisierung ergibt (Bild 5).

Dabei ist zu berücksichtigen, daß mikrotechnische Komponenten im Automobil unter teilweise extremen Umgebungsbedingungen mit hoher Zuverlässigkeit arbeiten müssen (z.B. Temperaturbereich von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, elektromagnetische Störfelder bis zu 300 V/m , Vibrationen mit Beschleunigungen bis zu 30 g).

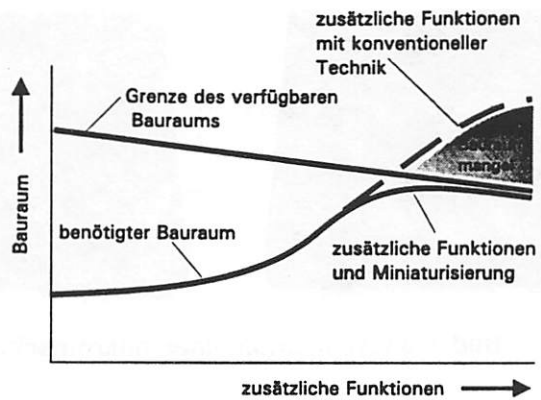


Bild 5. Bauraum im Automobil [4]

5. Aktuelle Sensor-Anwendungen

Seit Mitte der achtziger Jahre werden diskrete mikromechanische Druck- und Beschleunigungssensoren serienmäßig gefertigt (Bild 6). Dabei wurde zunächst die Bulk-Mikromechanik eingesetzt.

Bei mikromechanischen Drucksensoren mit piezoresistiver Signalauslesung deformiert der zu messende Druck eine Siliziummembran, in die Widerstände integriert sind. Diese ändern bei einer Dehnung ihren Wert. Über eine Hilfsspannung erhält man dann ein elektrisches Signal. Bild 7 zeigt einen solchen Drucksensor mit vier eindiffundierten Widerständen, einer Membranfläche von 1 mm^2 und einer Membrandicke von $20\text{ }\mu\text{m}$.

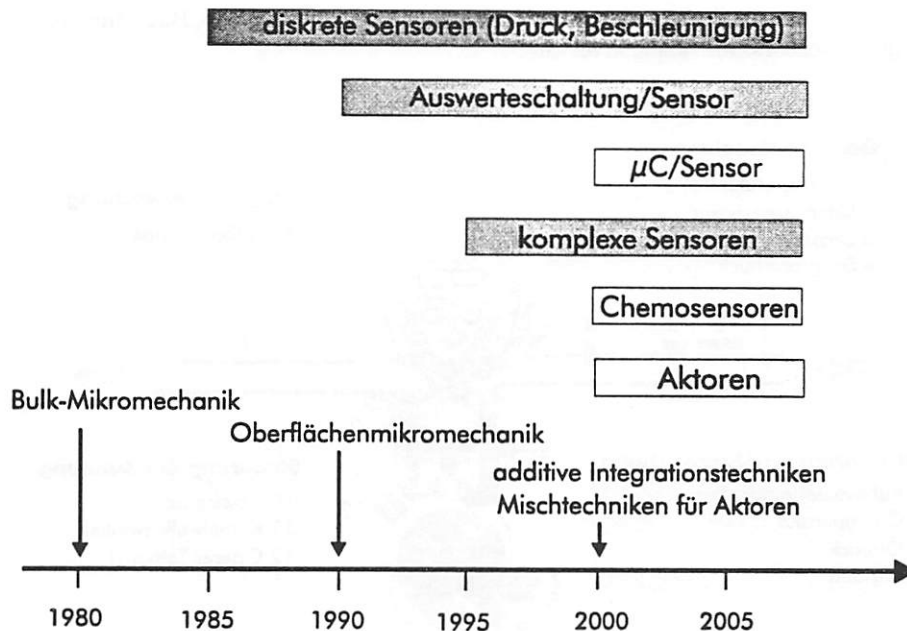


Bild 6. Mikromechanik im Automobil [5]

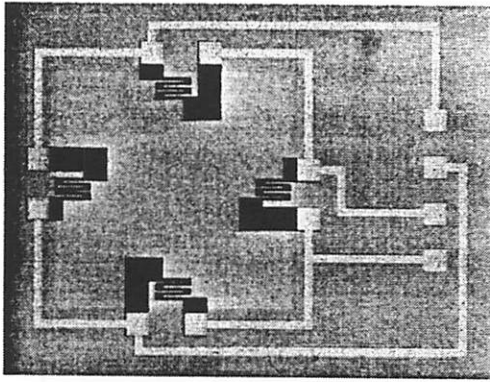


Bild 7. Silizium-Drucksensor mit piezoresistiver Signalauslesung

Zu Beginn der neunziger Jahre kommen die ersten monolithisch integrierten Sensoren auf den Markt. Bild 8 zeigt das Funktionsprinzip eines Beschleunigungssensors, der für die Anwendung in Airbag-Systemen entwickelt wurde und bei dem die Signalverarbeitungselektronik auf dem Sensor-Chip integriert ist [6]. Das Sensorelement wird mit den Verfahren der Oberflächen-Mikromechanik hergestellt. Das 1 mm² große Element besteht aus einem Anker aus Polysilizium als seismische Masse. Die von ihm ausgehenden Finger bilden die bewegten Platten eines Differentialkondensators. Den starren Platten des Kondensators werden komplementäre Rechtecksignale zugeführt. Das bei Auslenkung des Ankers infolge einer Beschleunigung an den bewegten Platten entstehende Rechtecksignal wird von einem Demodulator in eine Gleichspannung umgewandelt. Die

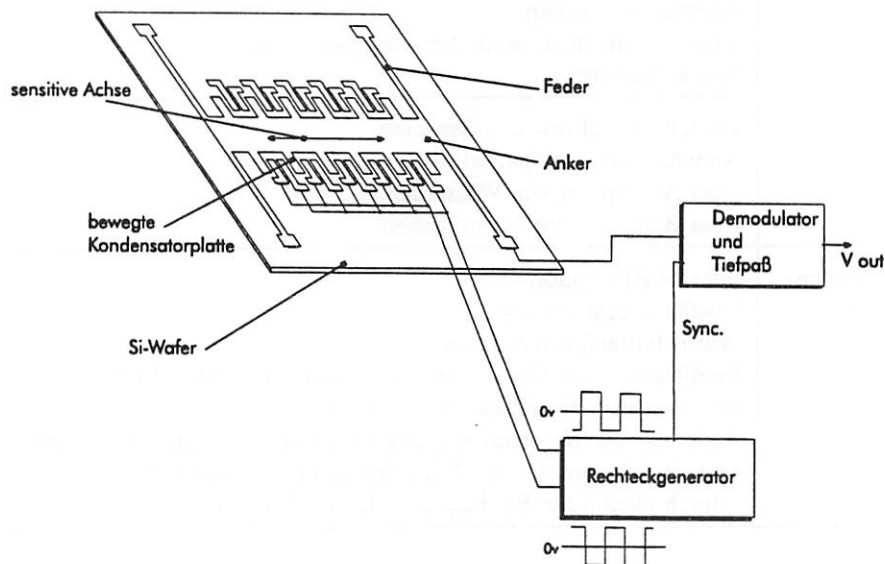


Bild 8. Funktionsprinzip eines Oberflächenmikromechanik-Beschleunigungssensors

Empfindlichkeit beträgt etwa 20 mV/g bei einem Meßbereich von ± 50 g.

6. Entwicklungstrends in der Sensorik

Neben der Diversifikation in der Anwendung von Druck- und Beschleunigungssensoren wird derzeit der Einsatz komplexer Sensoren wie Winkelgeber, Luftmassensensoren oder Drehratensensoren im Automobil vorangetrieben. Dabei werden zunehmend neue Materialien und Sensorprinzipien eingesetzt. In Tabelle 1 sind einige Meßprinzipien zusammengestellt, die in Mikrosensoren realisiert sind oder sich im Forschungsstadium befinden.

Die positiven Ergebnisse beim Einsatz von Satellitennavigationssystemen in der Flugführung legen eine Anwendung auch für den Landverkehr nahe. Um Störeffekte durch Abschattung oder Mehrwegeausbreitung des Satellitensignals (Bild 9) zu korrigieren, ist die Entwicklung von integrierten Navigationssystemen sinnvoll, die aus einem Satellitennavigationssystem und zusätzlich einem inertialen Meßsystem mit Beschleunigungs- und Drehratensensoren bestehen [7]. Mikrotechnische inertielle Meßsysteme können auch bei Crashversuchen zur Erfassung von Rotations- und Linearbewegungen von Versuchspuppen, insbesondere ihren Köpfen dienen.

Als Drehratenaufnehmer können prinzipiell Sensoren eingesetzt werden, die nach drei unterschiedlichen Effekten arbeiten: mechanische Kreisel, faseroptische Kreisel und vibrierende, auf dem Coriolis-Effekt basierende Kreisel (Gyroskope).

Tabelle 1. Sensorprinzipien für mikroelektronik-kompatible Sensoren

Meßgröße	Sensorprinzip
Temperatur	Temperaturabhängigkeit - des Widerstands von Metallen und keramischen Oxiden - der Elektronenbeweglichkeit in Halbleitern - der Durchlaßspannung von pn-Übergängen - der Frequenz von Schwingquarzen - der Wellenlänge der Photolumineszenz von Halbleitern - der Transmissionsverluste bei Glasfasern durch unterschiedliche Ausdehnung von Kern und Mantel berührungslose Messung mit Bolometern, pyroelektrischen und Halbleiter-Strahlungsdetektoren
Kraft, Druck, Dehnung	piezoresistiver Effekt kapazitive Sensoren Resonanzsensoren
Beschleunigung	Biegebalken mit seismischer Masse
Drehrate	faseroptischer Kreisel (Sagnac-Effekt) mechanisches Gyroskop (Coriolis-Effekt)
Position (Weg, Winkel, Abstand)	magnetische Sensoren (Hall-Effekt, Wiegand-Effekt, magnetoresistiver Effekt) optische Abstandsmessung Ultraschallmethoden kapazitive Drehwinkelsensoren
Füllstand	Temperaturmessung eines geheizten Widerstands Druckmessung potentiometrische und kapazitive Sensoren Transmissionsänderung einer gekrümmten Glasfaser optische Entfernungsmessung Resonanzsensoren
Durchfluß	Anemometerprinzip Ultraschallmethode nach dem Dopplerprinzip Korrelationsmessung
Feuchte	kapazitive und resistive Sensoren Änderung der mechanischen Resonanzfrequenz - bei Adsorption von Wasserdampf - bei Belegung mit Tautröpfchen
Chemische Zusammensetzung und Konzentration	Infrarot-Absorption Leitfähigkeitsmessung Wärmeleitfähigkeitsmessung Eindiffusion von Gas in die Gatelektrode eines MOSFET Ionensensitive Feldeffekt-Transistoren Änderung der Resonanzfrequenz bei zusätzlicher Massebelegung - durch Adsorption von Molekülen an einer selektiven Schicht - durch chemische Bindung an selektive Haftzentren

Letztere sind derzeit für eine Miniaturisierung am ehesten geeignet. Bild 10 zeigt das Funktionsprinzip eines mikromechanischen Gyroskops auf der Basis von Quarz [8]. Einkristalliner Quarz spielt als Werkstoff für mikromechanische Resonatoren eine sehr wichtige Rolle. Seine hochstabilen elastischen Eigenschaften erlauben die Herstellung von Resonatoren hoher Güte, und, da er als nicht-zentrosymmetrischer Kristall piezoelektrisch ist, ergibt sich eine einfache Möglichkeit zur elektrischen Anregung der elastischen Schwingungen.

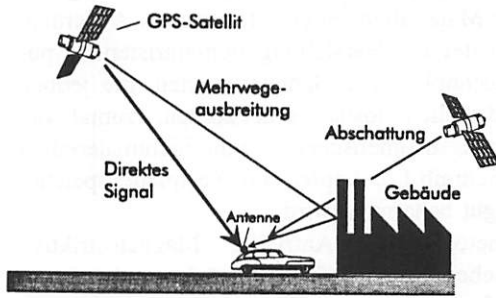


Bild 9. Satellitennavigation für den Landverkehr

Das Gyroskop mißt die Drehrate mit Hilfe einer schwingenden Quarz-Stimmgabel. Infolge der Coriolis-Kräfte erzeugt eine Rotation um die Längsachse des Sensors eine Schwingung der Aufnehmer-Stimmgabel, deren Amplitude proportional zur Drehrate ist. Nach Demodulation erhält

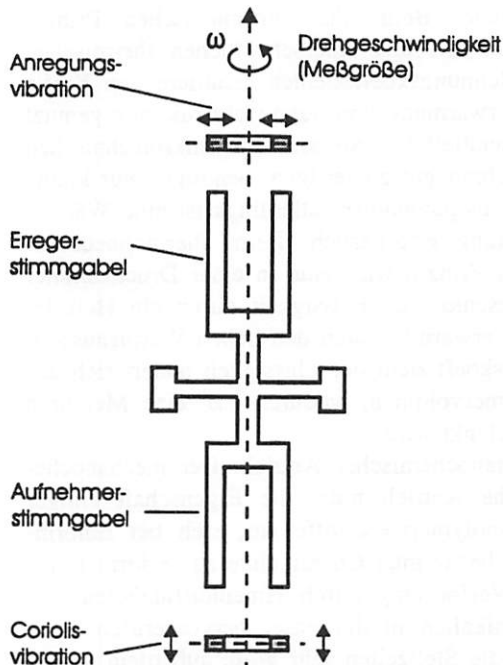


Bild 10. Prinzip eines mikromechanischen Gyroskops

man ein entsprechendes Gleichspannungssignal. Bei einem Meßbereich von 100 %/s beträgt die Auflösung des Sensors 0.002 %/s. Auch mit Hilfe der Silizium-Mikromechanik lassen sich Drehraten-Sensoren realisieren [9,10].

Bei der Mehrzahl zukünftiger Anwendungen im Automobil unterliegen die Mikrosensoren zunehmend der Forderung nach erhöhter Zuverlässigkeit. Dies erfordert zusätzlich zur Integration von Sensorfunktion und Elektronik auch die Integration von Selbsttestmöglichkeiten. Dabei ist es wichtig, daß die dafür notwendige Prozeßtechnologie in den Sensorfertigungsprozeß eingebunden werden kann. Bild 11 zeigt das Konzept für die Integration einer Selbsttestfunktion in eine Drucksensormembran [11]. Auf der Sensormembran werden zusätzlich zu den Piezowiderständen piezoelektrische Teilbereiche integriert, die eine Anregung der Membran zu resonanten Vibrationen ermöglichen. Aktiviert man die resonanten Membranoszillationen innerhalb eines Selbsttestzyklus und detektiert die Auslenkungen über die Piezowiderstände, so entspricht dies einem aktiven Sensorselbsttest.

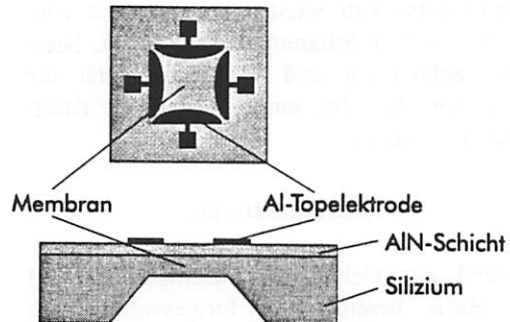


Bild 11. Drucksensormembran mit integrierter Selbsttestfunktion

Aufbauend auf dieser Technologiebasis können resonante Mikrosensoren für die Messung verschiedenster Größen entwickelt werden [12]. Das Prinzip solcher Sensoren beruht auf der Abhängigkeit der Eigenfrequenz schwingender mikromechanischer Strukturen von der zu messenden Größe. Im Gegensatz zu konventionellen Sensoren, die für die Signalaufbereitung einen Analog-Digital-Umsetzer benötigen, zeichnen sich Resonanzsensoren durch einen Frequenzgang aus. Weitere Vorteile sind hohe Empfindlichkeit und Langzeitstabilität, die störungsfreie Übertragung der quasi-digitalen Signale sowie die inhärente Selbsttestfunktion.

Als Beispiel zeigt Bild 12 einen resonanten mi-

kromechanischen Kraftsensor auf Silizium-Basis, der aus drei beidseitig im Silizium-Bulkmaterial verankerten dünnen Biegebalken besteht [13]. Dieser Dreifachbalkenresonator wird mit Hilfe einer piezoelektrischen Antriebsschicht zu antisymmetrischen Eigenschwingungen angeregt. Zug- oder Druckkräfte auf den Sensor in Längsrichtung verteilen sich zwischen den seitlichen Verstärkungsstegen und dem Resonatorelement, dessen Eigenfrequenz dadurch verändert wird. Die Empfindlichkeit beträgt etwa 8 kHz/N.

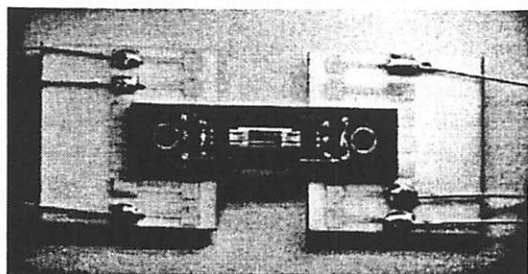


Bild 12. Resonanter mikromechanischer Kraftsensor [13]

Weitere mikrotechnische Sensoren, die voraussichtlich bis zum Ende dieses Jahrzehnts bis zur Serienreife entwickelt werden können, sind chemische Sensoren in Siliziummikromechanik. Hierbei sind Selektivität und Langzeitstabilität die Eigenschaften, die über einen Einsatz im Kraftfahrzeug entscheiden.

7. Mikroaktoren

Während das Gebiet der Mikrosensorik auf Silizium-Basis bereits weit fortgeschritten ist, befindet sich die Mikroaktorik noch im Stadium der Grundlagenentwicklung. Ihre große Bedeutung wurde erst in den letzten Jahren voll erkannt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß es in den meisten Fällen nicht möglich bzw. nicht sinnvoll ist, makroskopische Antriebe linear zu verkleinern. Einerseits können mit den Technologien der Mikrotechnik nicht beliebige Geometrien realisiert werden, sondern es stehen nur bestimmte Grundstrukturen wie Biegebalken oder Membranen zur Verfügung. Andererseits werden bei miniaturisierten Antriebsmechanismen Wirkprinzipien bedeutsam, die bei konventionellen Lösungen keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielen. So wurde in den vergangenen Jahren eine Reihe neuer Aktorkonzepte entwickelt, die im wesentlichen auf den Eigenschaften neuer Werkstoffe und Herstellungstechnologien beruhen.

Mögliche elektromechanische Wandlereffekte sind:

- **Elektrostatische Antriebe:** Elektrostatische Antriebe sind mit Mitteln der Mikrotechnik einfach zu fertigen. Die zu bewegende Struktur stellt die Gegenelektrode zu einer festen Elektrodenstruktur dar. Elektrostatische Mikroaktoren benötigen hohe Betriebsspannungen, die entsprechende Isolierungen erfordern. Außerdem ziehen elektrostatische Felder Staub an, was eine staubdichte Gehäusung notwendig macht.
- **Elektromagnetische Antriebe:** Elektromagnetische Antriebe werden aufgrund ihres Skalierungsverhaltens und der hohen Dichte magnetischer Materialien seltener favorisiert. Außerdem beinhaltet die Herstellung miniaturisierter Spulen technologische Schwierigkeiten, die jedoch grundsätzlich lösbar sein sollten, zumal die Technik magnetischer Dünnschichtmaterialien bei Schreib-Leseköpfen für Festplattenspeicher sehr gut beherrscht wird.
- **Magnetostriktive Antriebe:** Magnetostriktive Antriebe beruhen auf der Ausdehnung bestimmter Materialien unter Einwirkung magnetischer Felder. Die Abscheidung magnetostriktiver Materialien in Form dünner Schichten wird noch nicht sicher beherrscht.
- **Piezoelektrische Antriebe:** Piezoelektrische Antriebe beruhen auf der Ausdehnung entsprechender Materialien bei Anlegen eines elektrischen Feldes. Technologien zum Aufbringen piezoelektrischer Aktorschichten mit hohen Kopplungskonstanten (PZT) befinden sich zur Zeit noch in der Entwicklung.
- **Thermomechanische und thermopneumatische Antriebe:** Beim thermomechanischen Prinzip werden die aus unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten resultierenden Kräfte bei Erwärmung von Sandwichstrukturen genutzt (Bimetalleffekt). Sie sind mit mikrotechnischen Verfahren gut zu fertigen, benötigen nur kleine Betriebsspannungen, allerdings ist eine Wärmeableitung erforderlich. Beim thermopneumatischen Prinzip wird eine in einer Druckkammer eingeschlossene Flüssigkeit durch ein Heizelement erwärmt. Durch den hohen Wärmeausdehnungskoeffizient der Flüssigkeit ändert sich das Kammervolumen, wodurch z.B. eine Membran ausgelenkt wird.
- **Mechanochemischer Antrieb:** Der mechanochemische Antrieb nutzt die Eigenschaft einiger Hochpolymerwerkstoffe aus, sich bei Einbringung bestimmter Chemikalien zu verformen. Da die Verformung durch Hineindiffundieren von Chemikalien in die Faser hervorgerufen wird, sind die Stellzeiten sehr groß; außerdem ist der Transport der Flüssigkeiten mit Hilfe von Mikropumpen ein großes Problem im praktischen Einsatz. Forschungen an elektrisch stimulier-

Tabelle 2. Überblick über Eigenschaften verschiedener Aktorprinzipien

Antriebsprinzip	Stellkraft	Stellweg	Stellzeit	Bemerkungen
elektrostatisch	klein	mittel	schnell	hohe Betriebsspannungen, staubdichte Gehäusung
elektromagnetisch	klein	groß	schnell	Skalierungsprobleme, hohe Dichte magnetischer Materialien
magnetostraktiv	groß	klein	schnell	hohe magnetische Feldstärken
piezoelektrisch	groß	sehr klein	schnell	Kriech- und Hystereseeffekte, hohe Betriebsspannungen
thermomechanisch (Bimetall-Antrieb)	klein	mittel	mittel	Wärmeableitung
thermopneumatisch	groß	mittel	mittel	Wärmeableitung
mechanochemisch	klein	groß	langsam	Chemikalientransport mit Hilfe von Mikropumpen
Formgedächtnislegierungen	groß	groß	mittel	Wärmeableitung, inhärenter Sensoreffekt, Niedervolt-Aktor

baren Polymer-Gelen sollen dieses Problem beseitigen und eine höhere Dynamik des Antriebs erzielen.

- Formgedächtnislegierungen: Die Formänderung von Formgedächtnislegierungen (FGL) bei Temperaturänderung basiert auf einer Martensit-Austenit-Gefügeumwandlung. Im kalten Zustand befindet sich die FGL in der Martensitphase, die leicht plastisch verformbar ist. Wird die FGL erwärmt, wandelt sich das Formgedächtnismaterial in die Austenitphase um und nimmt dabei eine vorher bei hohen Temperaturen eingeprägte Form ein. Es können unterschiedliche Formänderungsarten (Längung, Kürzung, Biegung, Torsion) realisiert werden. Kühlt sich die FGL wieder ab, so wandelt sich der Austenit erneut in Martensit um. Durch eine äußere Kraft wird die Ausrichtung des entstehenden Martensitgefüges so beeinflusst, daß die gewünschte Kaltform eingenommen wird. Dazu werden mechanische Federn eingesetzt oder die FG-Aktoren im Agonist-Antagonist-Prinzip verschaltet. Während bisherige Anwendungen von FGL in der Mikroaktorik meist auf Drähten und Bändern aus FGL-Material beruhen, ist es kürzlich gelungen, dünne NiTi-Schichten mit Hilfe der Sputtertechnik abzuscheiden und zu strukturieren [14].

In Tabelle 2 sind die wichtigsten Eigenschaften der in Frage kommenden Antriebsprinzipien noch einmal zusammenfassend dargestellt.

Erste Entwicklungen im Hinblick auf einen Einsatz der Mikrotechnik im Bereich der Automobil-Aktorik sind Einspritzplatten aus Silizium, die auf dem Einspritzventil angebracht sind [5]. Die anisotrope Ätztechnik ermöglicht dabei die Herstellung sehr scharfer Kanten, die den Zerstäubungsvorgang positiv beeinflussen. Ein weiteres vielversprechendes Einsatzgebiet für mikrotechnische Aktoren im Kraftfahrzeug sind Dosierpumpen für den Einsatz in Zusatzheizungen, die eine Wärmeleistung von 3-5 kW abgeben [15].

8. Zusammenfassung

Die Anforderungen bezüglich Umweltfreundlichkeit, Sicherheit und Komfort treiben den Einsatz mikrotechnischer Komponenten, insbesondere von Mikrosensoren, im Automobil voran. Durch die im Automobilbau zu erwartenden hohen Stückzahlen - der Bestand von derzeit ca. 40 Millionen zugelassener PKWs in Deutschland - wird in den nächsten Jahren um etwa 500000 PKWs pro Jahr anwachsen - ist eine kostengünstige Fertigung absehbar.

Literatur

1. Büttgenbach, S.: Mikromechanik. Einführung in Technologie und Anwendungen. Stuttgart: Teubner, 1991
2. Büttgenbach, S., Than, O.: SUZANA: A 3D CAD tool for anisotropically etched silicon microstructures. Proc. European Design & Test Conference, Paris, 1996
3. Kleinschmidt, P., Schmidt, F.: How many sensors does a car need? Sensors and Actuators A, 31 (1992) 35-45
4. Ehlers, K.: Mikrosystemtechnik im Automobil. Eine Einschätzung des Potentials. Impulse No. 11. Wolfsburg: Volkswagen AG, 1991, S. 7-13
5. Marek, J.: Mikrosystemtechnik im Kfz. GME-Fachbericht No. 15. Berlin: VDE-Verlag, 1995, S. 291-304
6. Core, T.A., Tsang, W.K., Sherman, S.J.: Fabrication technology for an integrated surface-micromachined sensor. Solid State Techn. 36, No. 10 (1993) pp. 39-47
7. Vieweg, S.: Beitrag zur Beschreibung zeitvarianter Inertialsensorfehler durch hochgenaue Ortungsreferenz. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1996
8. N.N.: F & M 102, Nr. 11-12 (1994) S. 564
9. Funk, K., Schilp, A., Offenberger, M., Elsner, B., Lärmer, F.: Surface-micromachining of resonant silicon structures. Proc. 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Stockholm, 1995, Paper No. 519
10. Hashimoto, M., Cabuz, C., Minami, K., Esashi, M.: Silicon resonant angular rate sensor using electromagnetic excitation and capacitive detection. J. Micromech. Microeng. 5 (1995) 219-223
11. Nothelfer, U.: Entwicklung und Anwendung neuer Techniken zur Steigerung der Leistungsfähigkeit piezoresistiver Siliziumdrucksensoren. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1995
12. Büttgenbach, S., Fabula, Th., Schmidt, B., Wagner, H.-J.: Resonant force and pressure microsensors. Kongreßband SENSOR 95, Nürnberg, 1995, S. 27-32
13. Fabula, Th., Wagner, H.-J., Schmidt, B., Büttgenbach, S.: Triple-beam resonant silicon force sensor based on piezoelectric thin films. Sensors and Actuators A, 41-42 (1994) 375-380
14. Quandt, E., Holleck, H., Gugenberger, F., Seemann, K.: Magnetostriktive, piezoelektrische und Formgedächtnis-Dünnschichtaktoren. Wissenschaftlicher Bericht FZKA 5670. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 1995, S. 155-160
15. Kirsch, K., Funtsch, M., Zürl, K., Temmel, G., Folkmer, B., Ederer, I., Zech, U.: Projekte des Forschungsverbundes FORMIKROSYS aus den Bereichen Medizintechnik, Fertigungsautomatisierung und Kraftfahrzeugtechnik. Kongreßband SENSOR 95, Nürnberg, 1995, S. 587-592