

# Mikrosystemtechnik im Automobil

In modernen Kraftfahrzeugen garantieren kostengünstige und hochpräzise zuverlässige Mikrosensoren Sicherheit, Sparsamkeit, Sauberkeit und Komfort.

Hans-Peter Trah und Roland Müller-Fiedler

Die Mikrosystemtechnik gilt weithin als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Manche prophezeihen ihr sogar eine ähnlich revolutionierende Wirkung auf Wirtschaft und Gesellschaft wie einst der Mikroelektronik. Auch wenn diese Erwartungen – nicht zuletzt aus physikalischen Gründen – übertrieben erscheinen, so ist zumindest in der Automobiltechnik diese Revolution in vollem Gange – und das nicht erst seit der weit verbreiteten des Elektronischen Stabilitätsprogramms ESP.



Moderne Kraftfahrzeuge unterscheiden sich grundlegend von ihren Vorgängern, die noch vor zwei oder drei Jahrzehnten vom Band liefen. Während sich das äußere Erscheinungsbild eher evolutionär weiterentwickelte, hat sich die eigentliche Revolution unter der Motorhaube bzw. hinter den Verkleidungen abgespielt. Wer kennt sie nicht – die neuen Funktionen, die mittlerweile ganz selbstverständlich erwartet und vorausgesetzt werden? Airbags, Gurtstraffer, Anti-Blockier-System (ABS) und seit dem „Elch-Test“ auch das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) gehören heute schon fast zur Standardausrüstung moderner Kraftfahrzeuge, selbst in den kleinsten Klassen. Insbesondere diese Einrichtungen zur passiven und aktiven Sicherheit haben wesentlich dazu beigetragen, Unfälle einerseits durch Eingriff in die Fahrdynamik zu vermeiden und andererseits die Unfallfolgen für Fahrer und Beifahrer durch „intelligente“ Insassenschutzsysteme zu mildern.

Dass viele dieser Funktionen heute so kostengünstig verfügbar sind, dass sie großteils auch in Kleinwagen zur Standardausrüstung gehören, ist im Wesentlichen auf die rasanten Fortschritte im Umfeld zweier Schlüsseltechnologien zurückzuführen: Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik.

Die Mikroelektronik hat in den zurückliegenden Jahrzehnten Einzug in die Kraftfahrzeugtechnik gehalten und wesentlich zum Übergang von der Evolution zu dieser „Revolution“ beigetragen. Wo früher eine Drosselklappe im Zusammenspiel mit dem Vergaser die verbrannte Kraftstoffmenge festlegte, wird heute

durch ein elektronisches Steuergerät für jede Drehzahl und anliegende Last die optimale Kraftstoffmenge berechnet und dem Motor präzise dosiert zur Verfügung gestellt. Dabei geht es gleichermaßen darum, den Kraftstoffverbrauch wie die Schadstoffemission zu verringern. Hochentwickelte Systeme der elektronischen Motorsteuerung oder der „Electronic Diesel Control“ (EDC) tragen in Kombination mit modernster Dieseleinspritzung (Common Rail) bzw. der Benzin-Direkteinspritzung somit wesentlich zu den Leitzielen „sicher, sauber, sparsam“ bei.

Daneben spielt jedoch auch zunehmend Komfort im Kraftfahrzeug eine entscheidende Rolle. Dabei spannt sich der Bogen von der reinen körperlichen Annehmlichkeit, die beispielsweise durch den Einsatz von Klimaanlage unterstützt wird, über elektrische Verstellrichtungen für Sitze und Spiegel bis hin zu fahrerunterstützenden Systemen wie Abstandswarner oder Navigationssystemen.

Alle diese modernen Kraftfahrzeugsysteme sind entscheidend auf sensorische Eingangsgrößen aller Art angewiesen. Ohne die genaue Kenntnis von Temperatur, Druck, Beschleunigung, Drehrate, Drehzahl, Winkel, Kraft, Abstand, Drehmoment, chemische Zusammensetzung usw. wären diese Systeme undenkbar. Eine der größten Herausforderungen für die Entwicklungen in der Kfz-Sensorik liegt derzeit darin, diese Messdaten zuverlässig mit immer höherer Genauigkeit bei gleichzeitig immer geringeren Kosten zur Verfügung zu stellen. Hier hat sich die Mikrosystemtechnik als zweite tragende Säule und entscheidende Schlüsseltechnologie erwiesen.

Das Auto zählt zu den Einsatzgebieten, in denen das Potenzial der Mikrosystemtechnik wohl am eindrucksvollsten zur Geltung kommt [1, 2]. Bis vor wenigen Jahrzehnten beschränkte sich der Einsatz von Sensoren auf die Messung von Temperaturen, Drücken, Luftmassen sowie natürlich der Geschwindigkeit. Insbesondere durch die Fortschritte in der Mikroelektronik wurden neue Aufgaben für Sensoren erschlossen, die wesentlich zu den Zielen größerer Sicherheit, Sauberkeit und Sparsamkeit beitragen. Mikrosensoren bilden als Peripherie die Schnittstelle zwischen den komplexen Antriebs-

Dr. Hans-Peter Trah,  
Dr. Roland Müller-Fiedler, Zentralstelle  
Mikrosystemtechnik  
und Dünne Schichten,  
Zentralbereich  
Forschung und  
Vorausentwicklung,  
Robert Bosch GmbH,  
Postfach 10 60 50,  
D-70049 Stuttgart

Brems-, Fahrwerks- sowie Karosseriefunktionen und dem elektronischen Steuergerät als zentraler Signalverarbeitungseinheit. Sensoren übernehmen einerseits die Aufgabe, über den Betriebszustand des Fahrzeugs sowie über die Fahrzeugumgebung zu informieren, andererseits sind sie in zunehmendem Maße in Regel- oder Steuerungsfunktionen eingebunden.

Im Kraftfahrzeug treffen völlig unterschiedliche Anforderungsprofile aufeinander, deren gleichzeitige Erfüllung mit großen Herausforderungen an die Entwicklung und Fertigung von Sensoren einhergeht:

- ▶ Sie müssen ihre Aufgabe in einer rauen Umgebung sehr zuverlässig während der gesamten Lebensdauer des Fahrzeugs erfüllen.
- ▶ Sie müssen häufig eine hohe Genauigkeit gewährleisten, um anspruchsvolle Regelfunktionen der Systeme sicher erfüllen zu können.
- ▶ Sie müssen klein und leicht sein.
- ▶ Sie müssen sich kostengünstig fertigen lassen.

### Technologien für Mikrosysteme

Die Mikrosystemtechnik hat sich durch konsequente Nutzung der inhärenten Synergien aus Mikromechanik und Mikroelektronik weiterentwickelt. Allgemein ist ein Mikrosystem definiert als eine eigenständige Funktionseinheit, die mehrere Mikrotechnologien (Mikromechanik, Mikrofluidik, Mikrooptik etc.) in sich vereint und zusätzlich eine mikroelektronische Auswerteschaltung beinhaltet (monolithisch oder hybrid).

Die Mikromechanik entstand etwa seit Beginn der 1970er-Jahre als neue Technologie aus der Idee heraus, in der Halbleitertechnik etablierte Prozesse zu nutzen, um auf Halbleitersubstraten statt elektronischer Schaltkreise mechanische Strukturen herzustellen [3, 4]. Als wesentliches Merkmal baut die Silizium-Mikromechanik auf den Standard-Halbleiter Silizium, das kostengünstig, in großen Stückzahlen und als großflächige Wafer mit exzellenter Oberflächenqualität zur Verfügung steht. Aus der Halbleitertechnik nutzt die Silizium-Mikromechanik die sog. „Batch-Prozessierung“, in der einerseits eine Vielzahl von Strukturen parallel auf einem gemeinsamen Substrat gefertigt, andererseits mehrere Substrate gleichzeitig prozessiert werden. Erst dieser wichtige Vorteil ermöglichte es, Strukturen in großer Stückzahl kostengünstig zu fertigen. Die spezifischen Ätzprozesse zur Mikrostrukturierung beruhen im Wesentlichen auf den beiden Basistechnologien „Bulk-Mikromechanik“ (Anisotropes, nasschemisches Ätzen und Anodisches Bonden) und „Oberflächen-Mikromechanik“ (siehe Infokästen „Bulk-Mikromechanik“ und „Oberflächen-Mikromechanik“).

Mithilfe dieser Technologien lässt sich ein breites Portfolio von Mikrostrukturen als Wandlerelemente realisieren, die als Basis zur Herstellung von Mikrosensoren dienen. Den Sensoren liegen im Wesentlichen drei Wandlerstrukturen zugrunde:

- ▶ Dünne Membranen, die sich unter dem Einfluss von Drücken oder Kräften durchbiegen oder deren Wärmehaushalt sich durch entsprechende Vorgänge wie etwa erzwungene Konvektion oder lokale chemische Reaktionen ändert;
- ▶ Vertikal beweglich aufgehängte Massen in Bulk-Mikromechanik, die unter dem Einfluss von Kräften oder Beschleunigungen ausgelenkt werden;
- ▶ Lateral bewegliche Strukturen in Oberflächen-Mikromechanik, die unter dem Einfluss von Beschleunigungen seitlich ausgelenkt werden.

Die ständig steigende Komplexität der Mikrosysteme erfordert eine durchgängige Entwurfsmethodik, die nicht nur die Beschreibung der Kennlinienparameter des Systems (Empfindlichkeit, Auflösung, Kennlinienlinearität, Temperaturgänge, ...), sondern bereits zu einem frühen Zeitpunkt die Belange der Prüfbarkeit, Zuverlässigkeit und Kosten im Systemdesign berücksichtigt [7]. Die Technologien, die benötigt werden, um ein Mikrosystem unter dem Anspruch dieses ganzheitlichen Ansatzes treffsicher zu entwerfen und kostengünstig zu fertigen, umfassen daher mehr als nur die Strukturierungstechniken zur Darstellung der eigentlichen Mikrostruktur. Im Sinne dieser erweiterten Betrachtungsweise werden unter dem Begriff „Technologien“ die Techniken des Entwurfs und der Strukturierung, der Zuverlässigkeit und der Prüfung sowie der Integration zusammengefasst. Nur im Zusammenspiel ermöglichen sie die Fertigung von Mikrosystemen mit den geforderten Spezifikationen unter den Randbedingungen großer Stückzahlen, hoher Genauigkeit, niedriger Kosten und dem zuverlässigen Einsatz auch in sicherheitsrelevanten Anwendungen.

### Anwendungsbeispiele

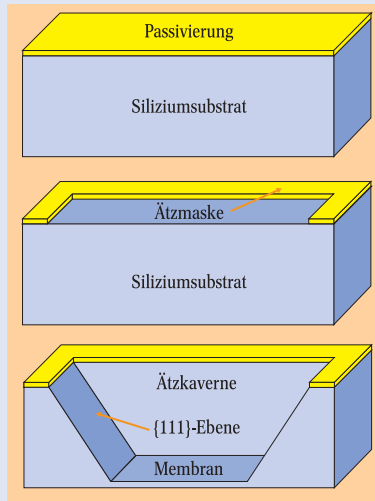
#### Beschleunigungssensoren

Das Potenzial der Oberflächen-Mikromechanik mit lateral beweglichen Strukturen lässt sich sehr gut am Beispiel eines Beschleunigungssensors verdeutlichen [8], dessen Funktionsprinzip Abb. 1 zeigt: Feste und

### Bulk-Mikromechanik

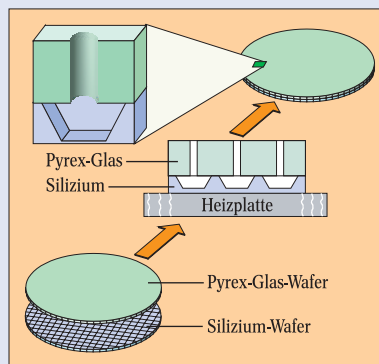
#### Anisotropes Ätzen von Silizium

Die Bulk-Mikromechanik formt mechanische Strukturen aus dem Vollmaterial (= Bulk). Hierbei wird die Eigenschaft des kristallinen Siliziumsubstrats genutzt, dass bestimmte Kristallebenen in geeigneten Ätzmedien wie heißer Kalilauge sehr viel langsamer geätzt werden als andere. Auf der Substratoberfläche ({100}-Ebene) wird eine ätzresistente Passivierung aus z. B.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  aufgebracht und strukturiert. Die Lauge kann nur in den offenen Bereichen angreifen. Die Ätzung in die Tiefe schreitet wesentlich schneller voran als an den {111}-Seitenwänden, die als schräge Begrenzungen mit definiertem Winkel einen Ätzstopp darstellen. Das Tiefenprofil lässt sich durch geeignete Dotierungen (Ätzstopp am pn-Übergang) oder über die Zeit einstellen [5].



#### Anodisches Bonden

Beim anodischen Bonden werden ein Silizium-Wafer und ein Wafer aus einem speziellen  $\text{Na}^+$ -haltigen Glas in engen Kontakt gebracht und aufgeheizt. Beim Anlegen einer negativen Spannung an das Glas werden die bei hohen Temperaturen beweglichen  $\text{Na}^+$ -Ionen von der Grenzfläche abgezogen, sodass aufgrund der ortsfesten  $\text{O}^{2-}$ -Ionen eine negative Raumladungszone entsteht. Die elektrostatische Anziehung bringt beide Wafer in engen Kontakt. Durch anodische Oxidation und Ausbildung von Si-O-Si-Brücken bildet sich schließlich eine äußerst feste chemische Verbindung.



bewegliche Kammstrukturen mit Abständen von wenigen Mikrometern bilden ein Feder-Masse-System als Wandlerelement. Die frei bewegliche seismische Masse bildet dabei mit zwei fest auf dem Substrat verankerten Gegenelektroden die Plattenkondensatoren  $C_1$  bzw.  $C_2$ , die als Differentialkondensator verschaltet sind. Laterale Beschleunigungen ändern den Abstand zwischen seismischer Masse und den beiden Gegenelektroden und somit die Kapazitäten. Bei entsprechender Verschaltung ist die Kapazitätsänderung der zu messenden Beschleunigung direkt proportional.

Bei wegmessenden Sensorprinzipien bietet es sich an, rückgekoppelte Systeme einzusetzen, bei denen eine variable elektrische Rückstellkraft an den Kondensatorplatten die beschleunigungsbedingte Auslenkung gerade kompensiert. Diese lagegeregelten Systeme weisen eine höhere Linearität und eine geringere Quersensitivität auf.

Die elektrische Empfindlichkeit beschreibt die Änderung der Ausgangsspannung  $U_a$  am C/U-Wandler bezogen auf die Beschleunigung  $a$

$$S_{el} = \left( \frac{dU_a}{da} \right)_{x=0} = \frac{m}{k_x} \cdot \frac{1}{d_0} \cdot U_{PL},$$

wobei  $d_0$  die Ruhelage der seismischen Masse ist und  $U_{PL}$  die am Plattenkondensator angelegte Spannung. Es ist offensichtlich, dass die Empfindlichkeit proportional zur seismischen Masse und zum Kehrwert der Federsteifigkeit  $k_x$  wächst. Andererseits ist der Term  $m/k_x$  direkt korreliert mit der Eigenfrequenz des Feder-Masse-Systems, sodass eine hohe Empfindlichkeit mit einer niedrigen Eigenfrequenz einhergeht. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass im Kraftfahrzeug Schwingungen mit Frequenzen bis zu mehreren Kilohertz auftreten können, die sich als Störsignale überlagern würden. In der Praxis werden daher die Eigenfrequenzen der Beschleunigungssensoren unter Verzicht auf eine höhere Empfindlichkeit so hoch angesetzt, dass sie außerhalb des Bereichs der Störfrequenzen liegen. Wegen der geringen Kapazitäten im pF-Bereich ist eine Auswerteschaltung vor Ort eng mit dem Sensorelement verbunden.

Neben der lateralen Detektion von Beschleunigungen ermöglicht es die Oberflächen-Mikromechanik auch, bewegliche Strukturen mit hoher Steifigkeit in der Ebene herzustellen, die sich unter dem Einfluss einer vertikalen Beschleunigung aus der Ebene herausbewegen. Die Bewegung wird durch planare Elektroden erfasst, die unter der beweglichen Struktur integriert sind. Auch in diesem Fall ist die Anordnung so aufgebaut, dass ein Teil der seismischen Masse aus der Ebene heraus, ein anderer jedoch in der entgegengesetzten Richtung ausgelenkt wird, sodass wieder ein Differentialkondensator gebildet wird.

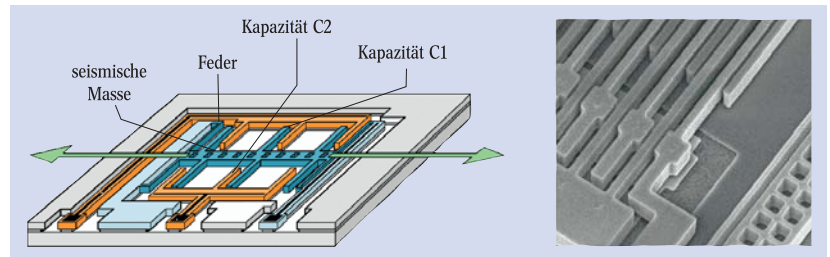
Je nach Einsatz lassen sich Beschleunigungssensoren als „Hoch-g-Sensoren“ (35–250 g) für den Insassenschutz (Airbag) bzw. als Nieder-g-Sensoren (0,8–1,2 g) für Anwendungen in der Fahrdynamik (ABS, ESP) auslegen.

### Drehratensensoren

Mikromechanische Drehratensensoren (Gyroskope) erfassen beispielsweise in Fahrzeugen mit elektronischem Stabilitätsprogramm (ESP) zur Fahrdynamikregelung die Drehbewegungen des Fahrzeugs um seine Hochachse beim Über- oder Untersteuern und vergleiche

nen diese mit einem Sollwert, der sich im Wesentlichen aus dem Lenkwinkel (Fahrerwunsch) und der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit ermitteln lässt. Weitere wichtige Anwendungen von Drehratensensoren sind die Detektion von Fahrzeugdrehungen um die Längsachse beim Überrollvorgang sowie die Verfolgung der Fahrbewegung in Navigationssystemen.

Abbildung 2 zeigt einen Größenvergleich unterschiedlicher Generationen von Drehratensensoren, das Funktionsprinzip sowie eine Detailaufnahme im Rasterelektronenmikroskop. Der als zweite Generation



**Abb. 1:** Kernstück des mikromechanischen Beschleunigungssensors sind feste und bewegliche Kammstrukturen (links). Eine bewegliche Masse bildet dabei mit zwei

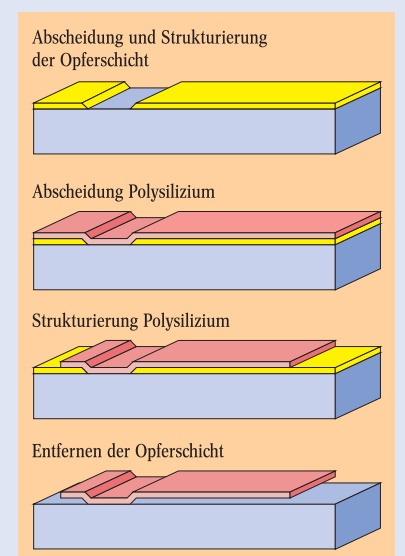
festen Gegenelektroden zwei Plattenkondensatoren. Der Elektrodenabstand in der der Kammstruktur beträgt ungefähr 2 µm (rechts).

dargestellte Drehratensensor basiert auf einer Kombination aus Bulk- und Oberflächen-Mikromechanik [9]. Durch anisotropes Ätzen werden aus dem Siliziumsubstrat zwei relativ dicke Platten als seismische Massen herausgeformt, die zu gegenphasigen lateralen Schwingungen mit ihrer Resonanzfrequenz angeregt werden. Zum Antrieb dient eine einfache, Strom führende Leiterbahn auf der jeweiligen Platte, die in einem senkrecht dazu angeordneten permanenten Magnetfeld eine laterale Lorentz-Kraft erfährt. Die Schwingbewegung wird durch eine separate Leiterbahn induktiv unter dem Einfluss des Magnetfeldes gemessen.

Bei einer Drehung um eine Achse senkrecht zur Chipoberfläche entsteht eine Coriolis-Beschleunigung, die sich als Vektorprodukt aus der Schwinggeschwin-

### Oberflächen-Mikromechanik

Die Oberflächen-Mikromechanik nutzt das Silizium-Substrat als Trägermaterial, um darauf aufbauend bewegliche Strukturen herzustellen. Im ersten Schritt wird eine „Opferschicht“ aus  $SiO_2$  abgeschieden und strukturiert. Eine nachfolgende Polysilizium-Abscheidung führt zu einer Siliziumschicht, die nur in den Öffnungen der Opferschicht mit dem Substrat verankert ist. Nach der lateralen Strukturierung des Polysiliziums durch Photolithographie und Ätzen wird die Opferschicht durch geeignete Ätzmedien entfernt, wobei die Siliziumschicht nicht beeinträchtigt wird. Hierdurch entstehen freitragende, bewegliche Siliziumstrukturen, die an definierten Stellen mit dem Substrat verankert sind [6].



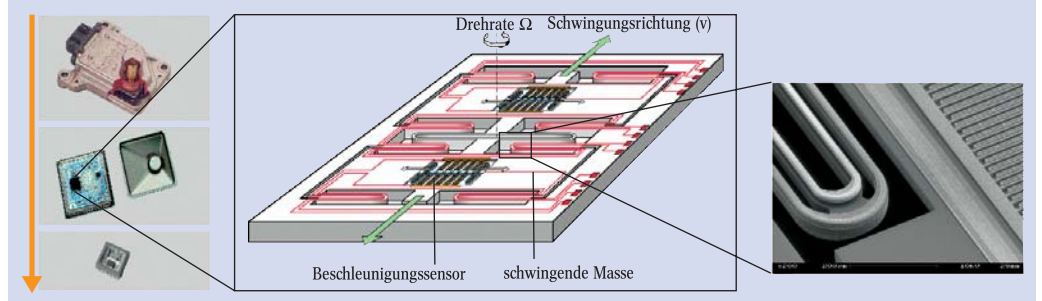
digkeit  $v$  des Bulkmikromechanik-Resonators sowie der zu detektierenden Drehrate  $\Omega$  ergibt:

$$a_c = -2\Omega \times v$$

Die Coriolis-Kraft wirkt in lateraler Richtung, jedoch senkrecht zur Schwingungsrichtung der seismischen Massen. Jede der schwingenden Massen trägt einen in Oberflächen-Mikromechanik gefertigten Beschleunigungssensor, dessen Detektionsrichtung parallel zur

eines Sensors nach dem piezoresistiven Prinzip als rückseitenbeaufschlagte Druckmesszelle mit Referenzvakuum [11]. Die Membran als mechanischer Wandler verformt sich durch die Druckeinwirkung derart, dass auf ihrer Oberfläche innen Zugspannungen, außen hingegen Druckspannungen auftreten. In die Membran sind vorderseitig Piezowiderstände eindiffundiert, die als elektromechanische Wandlerelemente dienen, da sich ihr Widerstand proportional zur mechanischen Deh-

**Abb. 2:** Generationen unterschiedlicher Drehratensensoren (links), Funktionsprinzip (Mitte) des mikromechanischen Drehratensensors (Kombination aus Bulk- und Oberflächenmikromechanik) und Detailaufnahme im Rasterelektronenmikroskop (rechts); die Breite der abgebildeten Einzelelemente der (U-förmigen) Koppelfederstrukturen beträgt ca. 20  $\mu\text{m}$



auftretenden Coriolis-Beschleunigung liegt. Die Coriolis-Beschleunigung und damit die Empfindlichkeit des Sensors sind also proportional zur Eigenfrequenz, mit der die resonante Struktur schwingt. Der mikromechanische Drehratensensor erreicht eine Auflösung von etwa  $0,1^\circ/\text{s}$  über einen Messbereich von  $100^\circ/\text{s}$ .

Die Signale der beiden schwingenden Massen sind gegenphasig, sodass unerwünschte Einflüsse durch externe Beschleunigungen (Querempfindlichkeit) als Gleichtaktsignal subtrahiert werden können. Bei neueren Generationen von Drehratensensoren werden sowohl die schwingenden Massen als auch die Beschleunigungsaufnehmer in Oberflächen-Mikromechanik gefertigt (dritte Generation in Abb. 2, [10]).

nung ändert. Der zugrundeliegende piezoresistive Effekt verknüpft die Längenänderung  $\varepsilon = \Delta l/l$  eines Widerstands  $R$  mit dessen relativer Änderung über als „ $k$ -Faktoren“ bezeichnete Proportionalitätskonstanten:

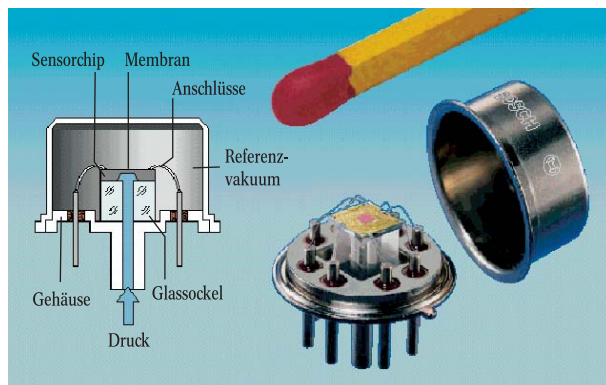
$$\frac{dR}{R} = k_l \cdot \varepsilon_l + k_t \cdot \varepsilon_t$$

Der Index  $l$  bzw.  $t$  bezeichnet jeweils die Richtung parallel (longitudinal) bzw. quer (transversal) zur Stromrichtung innerhalb des Widerstands.

Die Widerstandesänderung lässt sich einerseits auf eine reine geometrische Verformung der Struktur zurückführen, andererseits auf physikalische Effekte, die auf einer Variation der Beweglichkeit der Ladungsträger und somit des spezifischen Widerstands  $\rho$  beruhen. Bei Metallen ändert sich die intrinsische Leitfähigkeit bei Dehnungen nur unwesentlich, sodass hier der  $k$ -Faktor durch die Geometrie dominiert wird und  $k \approx 2$  gilt. Wesentlich höhere  $k$ -Faktoren ( $k > 100$ ) und damit größere Sensorempfindlichkeiten lassen sich mit Halbleitermaterialien durch Ausnutzung des piezoresistiven Effekts (Änderung der effektiven Massen der Ladungsträger durch Änderung der Bandkrümmung bei mechanischer Verzerrung) erreichen.

Die Membran wird aus Silizium in Bulk-Mikromechanik durch anisotropes Ätzen des Substrats realisiert, wobei sich die Membrandicke über einen Ätzstopp an einem genau definierten pn-Übergang sehr präzise einstellen lässt.

Die Vorderseite des Drucksensor-Chips trägt neben den Piezowiderständen einen kompletten, monolithisch integrierten Auswert-IC zur Signalaufbereitung. Der fertige Siliziumchip wird durch anodisches Bonden auf einem Glasträger fixiert und hermetisch dicht in ein Metallgehäuse gelötet. Der Glasträger weist eine Öffnung zur Einleitung des zu messenden Drucks des Mediums auf, zwischen dem Siliziumchip und der Metallkappe ist das Referenzvakuum eingeschlossen. Die rückseitige Druckbeaufschlagung stellt sicher, dass das Medium nicht mit der Auswerteschaltung in Kontakt kommt, sodass auch aggressive Medien infrage kommen. Bei Sensoren zur Messung des Luftdrucks ist der Glasträger hingegen unstrukturiert und das Referenzvakuum zwischen dem Chip und dem Träger eingeschlossen. Die Druckbeaufschlagung erfolgt in diesem Fall vorderseitig.



**Abb. 3:** Prinzip-Querschnitt (links) und Foto (rechts) eines mikromechanischen Drucksensors; die Dicke der drucksensitiven Membran (rot in Chipmitte) mit integrierten piezoresistiven Widerständen beträgt ca. 18  $\mu\text{m}$ . Um die Membran ist eine vollständige Signalauswerteschaltung (Abgleich von Empfindlichkeit und Offset, Kompensation der entsprechenden Temperatureingänge) in einem Bipolar-Prozess integriert.

### Drucksensoren

In der Silizium-Mikromechanik lässt sich sowohl der piezoresistive Effekt als auch eine kapazitive Messanordnung nutzen, um Drücke in Gasen und Flüssigkeiten in elektrische Signale zu wandeln. Die am weitesten verbreitete Methode zur Druckmessung verwendet zur Signalgewinnung zunächst eine dünne Membran als mechanische Zwischenstufe, die einseitig dem Messdruck ausgesetzt ist und sich unter dessen Einfluss durchbiegt. Abbildung 3 zeigt das Funktionsprinzip und den Aufbau

### Massenfluss-Sensoren

Der Heißfilm-Luftmassenmesser detektiert den Wärmetransport durch die vorbeiströmende Luft. In Bulk-Mikromechanik wird eine dünne Membran geformt, die im Gegensatz zum Drucksensor jedoch aus einer Schichtfolge unterschiedlicher, thermisch gut isolierender Dielektrika besteht und insgesamt nur eine Dicke von etwas mehr als einem Mikrometer aufweist. Auf der Membran ist mittig ein Heizwiderstand in Dünnschichttechnik aufgebracht, der die Messzelle auf einer konstanten Übertemperatur hält und einen definierten Temperaturgradienten zum Membranrand hin bewirkt. Beiderseits des Heizers sind Temperaturfühler angeordnet, die ohne Luftstrom gleiche Signale abgeben. Abbildung 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau sowie die Montage im Ansaugrohr [12].

Strömt Luft über den Sensor, so wird Wärme durch erzwungene Konvektion parallel zur Membranoberfläche transportiert. Dadurch stellt sich zwischen den Messstellen eine Temperaturdifferenz ein, die ein Maß für die Masse des Luftstroms ist. Sie ist zudem richtungsabhängig und erfasst somit nicht nur den Betrag, sondern kann Rückströmungen während des Ansaugvorgangs erkennen. Aufgrund der sehr dünnen mikromechanischen Membran reagiert der Sensor äußerst schnell (Zeitkonstanten im ms-Bereich) und kann auch pulsierende Luftströmungen erfassen.

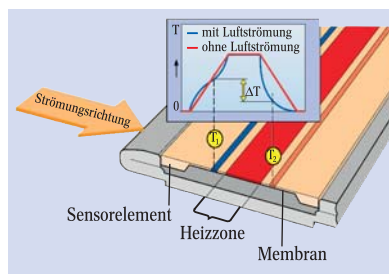
### Fragen zur Integrationstiefe

Das Substratmaterial Silizium bietet grundsätzlich die Möglichkeit, die mechanische Struktur und die mikroelektronische Schaltung auf einem gemeinsamen Chip zu integrieren. In der Anfangszeit der Mikrosystemtechnik galt diese monolithische Integration allgemein als der Königsweg, um „intelligente“ Mikrosysteme durch Kombination sensorischer, aktorischer und elektronischer Funktionen bereitzustellen. Am Markt werden beispielsweise Drucksensoren in Einchip-Technologie angeboten, bei denen die sensitive Membran als „Backend-Prozess“ in Bulk-Mikromechanik nach Fertigstellung der Auswerteschaltung in einem IC-Prozess gefertigt wird.

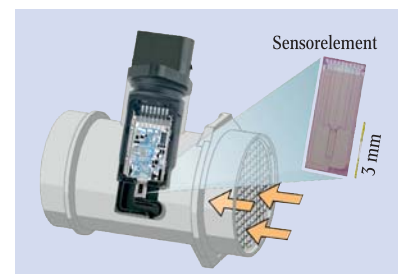
Die Prozessschritte der Mikromechanik und Elektronik sind jedoch teilweise nicht kompatibel hinsichtlich der genutzten Medien und/oder der erforderlichen Temperaturen. So erfordern die anisotropen nass-chemischen Ätzprozesse der Bulkmikromechanik in heißen Laugen einen aufwändigen Schutz bereits bestehender elektronischer Funktionen. Andererseits müssen sie aus Kontaminationsgründen grundsätzlich als Backend-Prozess nach Fertigstellung der Auswerteschaltung durchgeführt werden. Dies macht zusätzliche Prozessmodifikationen notwendig, die letztlich einen Kompromiss bedeuten und die inhärenten Vorteile der monolithischen Integration zumindest teilweise kompensieren. Zudem sind die Entwicklungszyklen der Mikroelektronik und der Mikromechanik in diesem Fall stark gekoppelt, sodass Generationswechsel in einem Bereich kostenintensive Nachentwicklungen im anderen Bereich nach sich ziehen.

Mittlerweile hat sich daher die hybride Integration von Mikromechanik und Mikroelektronik auf getrennten Chips in einem gemeinsamen Gehäuse als gleichberechtigter und teilweise sogar zu favorisierender zweiter Weg etabliert. Diese Zweichip-Lösung ermöglicht einerseits die optimale Prozessführung in jeder der beteiligten Technologien, ohne Rücksicht auf Kompatibi-

litätsfragen hinsichtlich Medien, Materialien oder Prozessführung. Andererseits sind die Generationswechsel entkoppelt, sodass sich beispielsweise eine neue Generation von Auswerte-ICs problemlos und kostengünstig mit der vorhandenen Vorgängergeneration von sensorischen Wandlerstrukturen kombinieren lässt. So basieren heute die meisten am Markt befindlichen Kfz-Sensoren auf der hybriden Integration von Mikromechanik und Mikroelektronik.



**Abb. 4:** Funktionsprinzip des mikromechanischen Massenflusssensors (links): Durch eine erzwungene Konvektion wird das Temperaturprofil einer extrem dünnen dielektrischen Membran vorzeichenrichtig und extrem schnell erfasst und ausgewertet. Die rechte Abbildung zeigt, dass das eigentliche mikromechanische Sensorele-



ment nur die Massenstromdichte (intensiv) in Rohrmitte erfasst, während der eigentliche Massenstrom (extensiv), den der Sensor erfasst, durch den Rohrdurchmesser definiert wird. Dies verdeutlicht auch die Problematik der Prüfbarkeit extensiver Zustandsvariablen.

### Marktbetrachtung und technische Randbedingungen

Mikrosysteme auf der Basis mikrotechnischer Komponenten lassen sich grundsätzlich einteilen in Sensor- oder Aktor-Systeme bzw. Systeme, die eine Kombination beider enthalten. In den zurückliegenden Jahren hat sich jedoch insbesondere die Mikrosensorik stürmisch entwickelt, sodass heute eine breite Auswahl miniaturisierter intelligenter Sensoren für unterschiedlichste Aufgaben kommerziell zur Verfügung steht. Zu dieser Entwicklung hat die Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten für Mikrosensoren im Kraftfahrzeug wesentlich beigetragen. Aktuelle Darstellungen über den Einsatz und die Marktentwicklungen der Sensorik im Kraftfahrzeug sowie der Mikrosystemtechnik allgemein finden sich z. B. in [13–15]. Eine detaillierte Analyse wurde kürzlich auch durch den Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) vorgelegt [16]. Insgesamt lässt sich abschätzen, dass derzeit jährlich weltweit ca. 200 bis 250 Millionen Sensoren für Kfz-Anwendungen auf Basis der Silizium-Mikrosystemtechnik gefertigt werden, wobei Deutschland und Europa einen wesentlichen Anteil davon bestreiten. Abbildung 5 zeigt einige der wichtigsten Aussagen dieser Erhebung.

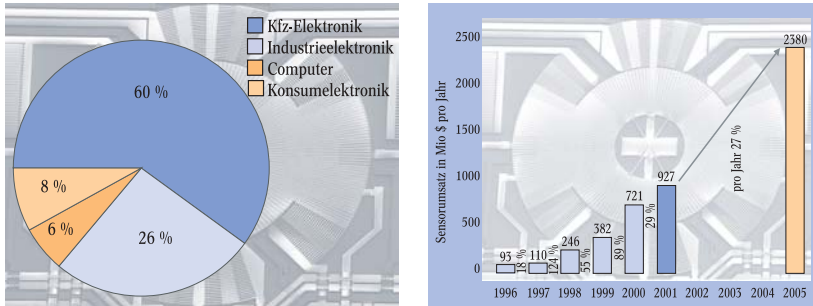
Diese Zahlen veranschaulichen in besonderem Maße, welche dominierende Rolle die Kfz-Anwendungen für die Silizium-basierte Mikrosensorik spielen. Umgekehrt lässt sich aber auch erahnen, in welcher entscheidender Weise die Mikrosystemtechnik gerade durch die Anwendungen im Kfz-Bereich vorangebracht wird.

Zum Abschluss soll kurz auf einige interessante Zusammenhänge zwischen den dargestellten neuen Technologien der Mikrosystemtechnik und deren wirtschaftlichen Auswirkungen eingegangen werden. Allen Basistechnologien der Mikrosystemtechnik sind fünf wesentliche Eigenschaften gemeinsam:

► Die Techniken haben sich aus Grundelementen der

Mikroelektronik-Prozesse entwickelt und zeichnen sich deshalb durch eingeschränkte Möglichkeiten hinsichtlich der dreidimensionalen Strukturierbarkeit aus.

► Die Prozesse erfordern in der Regel sehr hohe Basisinvestitionen, die denen in der Halbleiter-Industrie vergleichbar sind. Dies hat unmittelbar zur Folge, dass mikrosystemtechnische Lösungen nur bei sehr hohen Stückzahlen wirtschaftlich werden können und dass sich selbst große Hersteller bei der Anzahl der Basistechnologien beschränken müssen.



**Abb. 5:** Markt- und Prognose-Diagramme für Silizium-basierte Mikrosensoren nach [16] (links); Prognose der Weltmarktentwicklung für Kfz-Sensoren in der Mikrosystemtechnik bis 2005 (rechts).

► Die notwendigen Zeiträume zur Entwicklung der Basistechnologien für Kfz- und großserientaugliche Mikrosystemtechnik-Prozesse liegen bei typischerweise fünf bis zehn Jahren. Die Entwicklungszeiten von neuen Systemfunktionen im Automobil sind dagegen oft wesentlich kürzer. Daher kommt der Treffsicherheit der Technologieplanung in der Mikrosystemtechnik eine unter Umständen höchst erfolgsentscheidende Bedeutung zu.

► Die Techniken sind allesamt sog. Batch-Techniken, d. h. es handelt sich um Nutzenfertigung mit entsprechenden Kostenpotenzialen bei Miniaturisierung der Bauteile. Im Gegensatz zur Mikroelektronik werden aber durch die Verkleinerung mikrosystemtechnischer Bauteile nicht automatisch auch Funktionserweiterungen zugänglich – manchmal ist sogar eher das Gegenteil der Fall: je kleiner das Bauteil, desto kleiner wird das Primärsignal bzw. der Einfluss von Prozessstreuungen und desto höher wird unter Umständen der Aufwand in der Signalauswertung bzw. beim Abgleich.

► Die Entwicklung der Mikro-Aktuatorik, die einen Teil der „fehlenden“ Markterweiterungen zur Finanzierung neuer Technologiegenerationen liefern könnte, hinkt der Situation im Bereich der Sensorik allerdings deutlich hinterher. Die Skalierungsgesetze der Aktuatorik unterscheiden sich grundlegend von denen der Mikrosensorik. Aktoren steuern im Allgemeinen extensive Zustandsvariablen (Kräfte, Wege, Massenflüsse, ...) und lassen sich daher bei vorgegebener Spezifikation nicht ohne Inkaufnahme von Funktionseinbußen miniaturisieren.

Führt man sich diese Faktoren vor Augen, so wird klar, dass die Mikrosystemtechnik auch in naher und mittlerer Zukunft sowohl in technisch-wissenschaftlicher als auch in ökonomischer Hinsicht ein überaus interessantes Betätigungsfeld bleiben wird. Ihre Potenziale sind enorm, nicht zuletzt zur Sicherung der Wettbewerbsposition Deutschlands in wichtigen Industriezweigen wie der Kfz-Industrie. Aber auch für allgemeine gesellschaftliche Ziele wie „Schonung der Umwelt“, „effiziente Nutzung von Ressourcen“, „Erhöhung der individuellen Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer“ und nicht zuletzt der Sicherung wettbe-

werbsfähiger Arbeitsplätze am Standort Deutschland ist die Mikrosystemtechnik ein Schlüssel, den wir möglichst effizient für unsere Zukunft nutzen sollten.

**Literatur**

- [1] W. J. Fleming, IEEE Sensors Journal **1**, 296 (2001)
- [2] Sensoren im Kraftfahrzeug, Robert Bosch GmbH, Stuttgart 2001
- [3] K. E. Petersen, Proc. IEEE **70**, 420 (1982)
- [4] J. A. Angell, S. C. Terry, P. W. Barth, Spektrum der Wissenschaft, Juni 1983, S. 38
- [5] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger und H. Baumgärtel, J. Electrochem. Soc. **137**, 3612 (1990)
- [6] F. Lärmer, A. Schilp, K. Funk und M. Offenber, Proc. of IEEE MEMS'99 Conference, Orlando, 1999, S. 211
- [7] H.-P. Trah, J. Franz und J. Marek, Advances in Solid State Physics **39**, 25 (1999)
- [8] M. Offenber et al., SAE Int. Congr. Expo. (Detroit, 1996), paper 960758
- [9] M. Lutz et al., SAE Int. Congr. Expo. (Detroit, 1998), paper 980267
- [10] A. Thomae et al., SAE Int. Congr. Expo. (Detroit, 1999), paper 1999-01-0931
- [11] H.-J. Kress et al., SAE Int. Congr. Expo. (Detroit, 1995), paper 950533
- [12] U. Konzelmann, H. Hecht und M. Lembke, SAE Int. Congr. Expo. (Detroit, 1995), paper 950433
- [13] R. Grace, Market Opportunities for MEMS/MST in Automotive Applications, AMAA Yearbook 2001, S. 3
- [14] Intechno-Weltreport Sensormärkte 2008, Intechno Consulting, Basel, März 1999
- [15] H. Wicht, M. Illing und R. Wechsung, The Automotive Microsystems Market: Insights from the NEXUS Market Study 2001, AMAA Yearbook 2001, S. 13
- [16] Mikroelektronik – Trendanalyse bis 2005, ZVEI, Frankfurt am Main, November 2001

**Die Autoren**

**Hans-Peter Trah** studierte Mineralogie und Kristallographie in Stuttgart und Freiburg und promovierte 1988 über Flüssigphasen-Heteroepitaxie. 1989 begann er seine Tätigkeit bei der Robert Bosch GmbH in der Entwicklung von Mikrosensoren und Mikroaktoren auf Silizium-Basis. Darüber hinaus befasste er sich intensiv mit Fragen des Entwurfs und der Prüftechnik für Mikrosysteme. Seit 1999 leitet er die Abteilung „Mikrosystemtechnik und Dünne Schichten“ im Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung. Darüber hinaus engagiert er sich in verschiedenen Gremien des ZVEI, des VDI/VDE sowie des BMBF für die Mikrosystemtechnik.



**Roland Müller-Fiedler** studierte Physik in Kaiserslautern, wo er 1984 über niederenergetische Elektronenstreuung an Helium-Atomen promovierte. Nach zwei Jahren als Postdoc in Kanada arbeitet er seit 1986 bei der Robert Bosch GmbH im Zentralbereich Forschung und Vorausentwicklung. Sein Arbeitsschwerpunkt verlagerte sich vom Einsatz der Mikrosystemtechnik für mikro- und integriert-optische Anwendungen in der Nachrichtentechnik zur Entwicklung von Mikrosensoren für Kraftfahrzeuge. In der Abteilung „Mikrosystemtechnik und Dünne Schichten“ leitet er heute die Arbeitsgruppe Zuverlässigkeitstechnik.

