

20 Jahre mikromechanische siliziumbasierte Drucksensoren

Siliziumbasierte mikromechanische Drucksensoren sind in unserer Alltagswelt beinahe allgegenwärtig. Im Automobil gewährleisten sie optimale Betriebsbedingungen für den Motor, indem sie für das Motorsteuergerät den Unterdruck im Ansaugtrakt und den barometrischen Umgebungsluftdruck ermitteln, sie tragen als Bestandteil des Tankentlüftungssystems zum Schutz der Umwelt vor Kohlenwasserstoff-Emissionen bei, und sie machen das Autofahren sicherer, in dem sie einen Druckverlust in einem Reifen rechtzeitig feststellen.

Am Arbeitsplatz und in unseren Wohnungen werden Differenzdrucksensoren in Klimaanlage eingesetzt, um das geförderte Luftvolumen zu steuern, die Ventilatoren zu regeln und den Zustand der Luftfilter zu überwachen. Sogar in unserer Freizeit finden wir Drucksensoren in elektronischen Wetterstationen, in Wander- und Fahrrad-Computern und in Tauchausrüstungen.

Das Schlüsselement zur Ausnutzung dieses Effekts ist der Piezo-Widerstand, der durch einen p-dotierten diffundierten Widerstand in einem n-dotierten Halbleitersubstrat gebildet wird. Wird dieses Substrat – und damit auch der Piezo-Widerstand – mechanischen Spannungen ausgesetzt, ändert sich dessen elektrischer Widerstand. Tritt eine Zugspannung in Längsrichtung auf, so steigt der Widerstands-

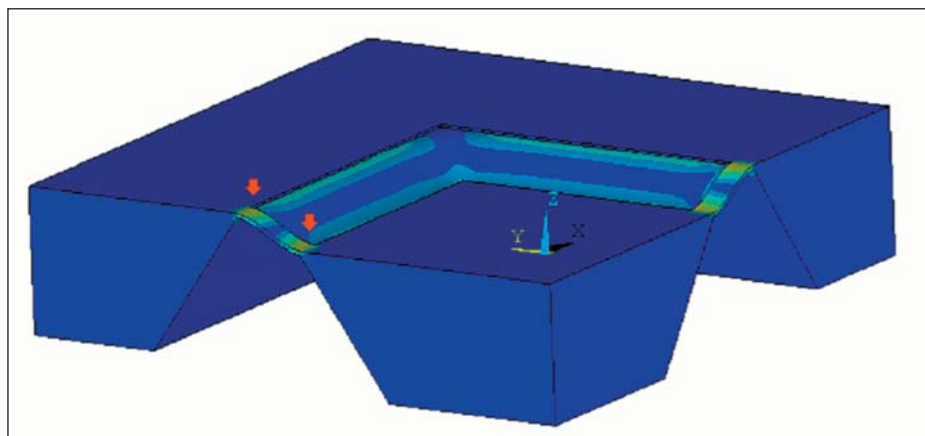
Membran hervorgerufen wird, den Widerstand zweier gegenüberliegender Widerstandselemente erhöht und den der beiden anderen Widerstandselemente verringert.

Als alternatives Funktionsprinzip eines Drucksensors kann die Änderung der Kapazität ausgenutzt werden, die sich durch die Verschiebung der sich unter Druck durchbiegenden Membran gegenüber einer feststehenden Elektrode ergibt. Diese Kapazitätsänderung wird elektrisch typischerweise dadurch ausgewertet, dass die Frequenzänderung eines Oszillators bestimmt wird, der mit Hilfe dieser Kapazität gebildet wird.

Die ersten siliziumbasierten Drucksensoren wurden hergestellt, indem Silizium-Dehnungsmessstreifen auf elastische Stahlmembranen aufgebracht wurden, die ihrerseits mittels konventioneller Bearbeitungstechniken wie Drehen, Schleifen und Polieren hergestellt wurden. Dieses Prinzip wird immer noch für aktuelle Hochdrucksensoren verwendet, die Drücke von 1.000 bar und mehr messen können. Fortschritte in der MEMS¹-Technologie haben es bald ermöglicht, Druckmembranen durch volumen- oder bulkmikromechanische Fertigungsverfahren herzustellen. Darunter versteht man Verfahren, die Strukturen tief ins Volumen eines Silizium-Wafers ätzen.

Nassätzen einer Sensormembran mit Kaliumhydroxid (KOH) ergibt Membranen mit wohldefinierter Form und Dicke. Seitdem hat die auf diese Weise entstehende Grundstruktur des Drucksensors einen eher evolutionären als revolutionären Entwicklungspfad durchlaufen.

Die Erfassung sehr niedriger Drücke (bis hinunter auf 10 mbar bzw. 0,15 psi)



▲ Abb. 1: FEM-Simulation der mechanischen Spannungskonzentration – hervorgehoben durch rote Pfeile – in einem differentiellen Niederdruck-Sensor mit einer Verstärkung der Membrane
Fig. 1: FEM simulation of mechanical stress concentration – highlighted with red arrows – in a differential low-pressure sensor with a boss structure in the diaphragm (courtesy of Silicon Microstructures, Inc.)

Diese Entwicklung wurde möglich durch Beiträge von zahlreichen Erfindern und Forschern seit der Entdeckung des piezo-resistiven Effekts – also des sich ändernden elektrischen Widerstandes durch das Vorhandensein einer mechanischen Spannung – in Silizium und Germanium, erstmals 1954 durch Charles S. Smith veröffent-

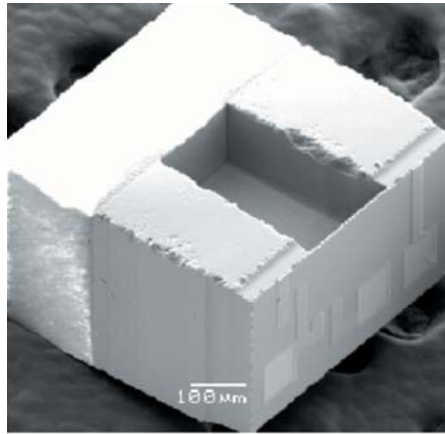
wert, tritt eine Zugspannung in Querrichtung auf, dann sinkt er. Um daraus einen Drucksensor zu bauen, werden vier dieser Piezo-Widerstände auf einer Membran als Wheatstone-Brücke angeordnet, und zwar so, dass die mechanische Spannung, die durch eine Druckdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite der

¹ MEMS = Micro Electro-Mechanical System

würde entweder sehr große oder sehr dünne Membranen erfordern, beides mit ungünstigen Auswirkungen auf Ausbeute und Herstellkosten. Alternativ erfolgt eine Konzentration der mechanischen Spannungen direkt unterhalb der spannungsempfindlichen Piezo-Widerstände, und zwar mittels einer Membran, die in ihrer Mitte verstärkt ist und dickere Stege unter den Piezo-Widerständen besitzt. Diese Struktur erlaubt es, die durch Druckdifferenzen zwischen Vorder- und Rückseite der gesamten Membranfläche (einschließlich der Verstärkung) ausgeübten Kräfte regelrecht »einzusammeln« und diese auf den schmalen dünnen Bereich des Sensors zu konzentrieren. Abb. 1 zeigt diese mechanische Spannungskonzentration auf den Stegen nahe des Sensorsubstrates und der Verstärkung mittels einer FEM-Simulation.

Raue Umgebungsbedingungen erfordern besseren Schutz der elektrischen Sensorstrukturen gegenüber dem unter Druck stehenden Medium. Dies kann durch Abschirmungsschichten und Edelmetalle für die elektrischen Leiterbahnen erfolgen oder durch Schutz der Sensorvorderseite vor dem Medium, indem lediglich die Rückseite für das umgebende Medium zugänglich ist. Solche Rückseiteneintrittskonzepte sind speziell in Automobilanwendungen verbreitet, wie z. B. in Reifendrucküberwachungssystemen oder für die Unterdruckmessung im Ansaugtrakt.

DRIE (Deep Reactive Ion Etching), ein stark anisotropes Plasma-Trockenätzverfahren, das seit den 90er Jahren kommerziell verfügbar ist, erlaubt die Herstellung von volumen-mikromechanischen Strukturen mit Seitenwänden, die nahezu rechtwinklig zur Wafer-Oberfläche verlaufen, im Vergleich zu den 54,7° Seitenwandneigung, die durch KOH-Ätzverfahren erzeugt werden. Damit ist es möglich, Drucksensoren mit orthogonalen Seitenwänden um die Druckmembran herum herzustellen. Dies reduziert die erforderliche Größe der Sensorchips auf ein Mini-



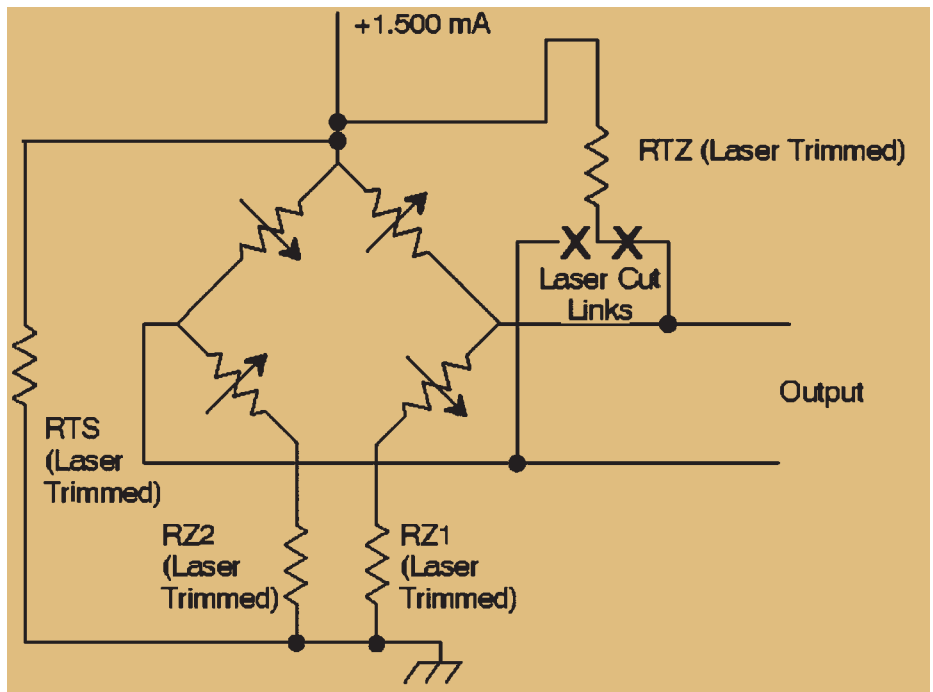
▲ **Abb. 2: Extrem kleiner Drucksensorchip, hergestellt mittels Deep Reactive Ion Etching**

Fig. 2: Ultra small pressure sensor die created by deep reactive ion etching (courtesy of Silicon Microstructures, Inc.)

um, das nicht mehr durch die Seitenwandneigung aus dem KOH-Nassätzverfahren, sondern nur noch durch die Membrangeometrie bestimmt wird. Abb. 2 zeigt die REM-Aufnahme eines Querschnitts durch einen extrem kleinen Drucksensor mit einer Chip-

größe von lediglich 0,65 x 0,65 mm². Die elektrischen Eigenschaften von dotiertem Silizium, besonders im erweiterten Temperaturbereich wie z.B. -40 °C bis +85 °C, +125 °C oder mehr (für Automobilanwendungen üblicherweise gefordert), sowie unvermeidbare Herstellungstoleranzen haben bald den Fokus auf die Verarbeitung der Sensorsignale erweitert. Die typischen zu korrigierenden Parameter sind Nullpunktversatz (Zero Offset, d. h. die Brückenspannung ohne angelegten Druck) und Empfindlichkeit (Sensitivity, d. h. das $\Delta U/U$, mit dem die Brücke auf Druckveränderungen reagiert). Diese Werte sind stark temperaturabhängig und nichtlinear.

Für geringe Genauigkeitsanforderungen reicht in der Regel ein einfaches passives Widerstandsnetzwerk zur Kompensation aus. Ein Abgleich dieses Netzwerks ergibt Sensorelemente mit Toleranzwerten im Prozentbereich über einen begrenzten Temperaturbereich. Da die einzelnen Abgleich



▲ **Abb. 3: Beispiel für ein Kompensationsnetzwerk für Konstantstrombetrieb. Die Abgleichwiderstände für den Nullpunkt (RZ1, RZ2) legen die anfängliche Nullpunktverschiebung fest, RTS kompensiert den negativen Temperaturkoeffizienten der Empfindlichkeit dadurch, dass der Strom durch die Wheatstone-Brücke erhöht wird, RTZ arbeitet entgegen der Nullpunktverschiebung über Temperatur.**

Fig. 3: Constant current compensation network example. The zero trim resistors (RZ1, RZ2) settle the initial zero offset, RTS compensates the negative temperature coefficient of sensitivity by increasing the current through the Wheatstone bridge, RTZ works against the change in offset over temperature.

schritte für die verschiedenen Widerstände sich alle wechselseitig beeinflussen, ist die Ermittlung eines Kalibrierungsablaufes für derartige Widerstandsnetzwerke mühsam.

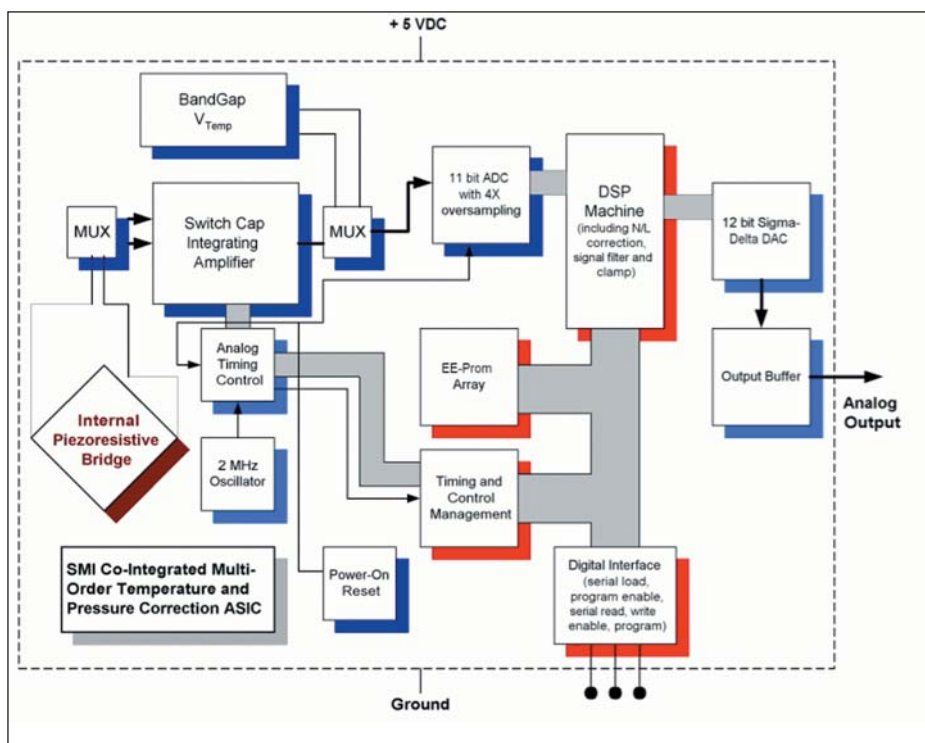
In den 90ern hat die Halbleiterindustrie dieses Kompensationsproblem überwunden, indem Sensorsignalverarbeitungs-ICs zur Verstärkung, zum Treiben, zur Kompensation und zur

90er Jahren erzielt. Die Verfügbarkeit integrierter E²PROMs² in Verbindung mit digitaler Signalverarbeitungstechnologie vermeidet den Laserabgleich vollständig und erweitert die Möglichkeiten, Sensormodule aufzubauen und zu verkapseln, da die komplette Kompensation und Kalibrierung nun auf rein elektrischem Weg erfolgen kann, also ohne aufwändiges Abgleichen

tenbearbeitung direkt in den monolithischen Sensorsignalverarbeitungs-IC eingebracht wurde, steht ein vollständig kompensierter und kalibrierter Sensorchip mit verstärktem Ausgangssignal zur Verfügung, der einen sehr geringen Flächenbedarf besitzt. Er kann damit sowohl als Chip-on-Board als auch in SMD-Gehäusen eingesetzt werden.

Die wesentliche Herausforderung beim Verpacken von Drucksensoren ist die Entkopplung von mechanischen Spannungseinflüssen. Schließlich ist zu berücksichtigen, dass siliziumbasierte Drucksensoren aus Dehnungsmessstreifen entstanden sind und damit inhärent empfindlich gegenüber allen Arten von mechanischen Spannungen sind, seien sie beabsichtigt (durch die Durchbiegung der Membran unter Druckänderungen) oder ungewollt (hauptsächlich durch unelastische Chipkleber und nicht zusammenpassende Ausdehnungskoeffizienten der Gehäusematerialien und des Sensorsilizium). Daher ist die mechanische Stabilität ein wesentliches Leistungsmerkmal für ein Sensorgehäuse.

Der erste Schritt zu einer mechanischen Verstärkung wird normalerweise bereits auf der Sensorchipebene erreicht, indem der Silizium-MEMS-Wafer dauerhaft verbunden wird mit einem Borosilikatglas-Substrat (häufig als Pyrex[®] Glas bezeichnet, nach einem Markennamen der Firma Corning). Dies wird durch das so genannte anodische Bonden erreicht, ein Verfahren, bei dem hohe Temperatur ($\approx 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) und hohe Gleichspannung (500 - 1.000 V, negative Spannung auf der Glasseite) auf ein Sandwich aus Silizium-MEMS- und Glas-Wafer wirken. Die im Glas-Wafer vorhandenen, positiv geladenen Natriumionen werden durch die hohe Temperatur beweglich und werden durch die negative Spannung angezogen. Es bleibt eine negative Raumladungszone an der Silizium/Glas-Grenzfläche. Durch Herunterkühlen bei nach



▲ Abb. 4: Blockschaltbild einer digitalen Sensorsignalverarbeitungsschaltung, analoge Schaltungsteile blau, digitale rot hinterlegt
 Fig. 4: Block diagram of a digital sensor signal processor, analog sections in blue, digital section in red (courtesy of Silicon Microstructures, Inc.)

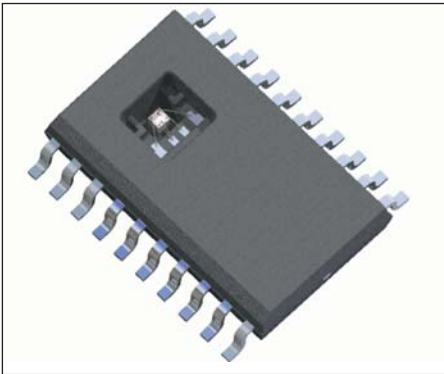
Kalibrierung von MEMS-Strukturen auf den Markt gebracht wurden, die die Kompensation und Kalibrierung von Sensoren von einer Geheimwissenschaft zu einer für fast jeden Ingenieur zugänglichen Standardmethode gemacht haben. Derartige ICs enthalten typischerweise eine gesteuerte Stromquelle zum Treiben der Sensorbrücke und einen programmierbaren Verstärker zur Einstellung der Empfindlichkeit. Sie müssen jedoch immer noch gemeinsam mit dem Sensor auf einer Hybridschaltung platziert werden und erfordern den Laserabgleich von Widerständen auf diesem Hybrid. Der Durchbruch für die Kompensation und Kalibrierung wurde in den späten

irgendwelcher elektrischer Komponenten.

Während die meisten Sensor-Anwendungen zurzeit noch von einem analogen Sensorausgangssignal ausgehen, ist ein klarer Trend zu rein digitalen Schnittstellen, wie z. B. I²C, SPI oder LIN (im Automobilumfeld) zu beobachten - zumal in den meisten Anwendungsbereichen der Sensorausgang ohnehin mit einem Mikrocontroller verbunden ist, der digitale Druckmesswerte auswerten kann und damit das analoge Sensorsignal letztendlich überflüssig macht.

In Verbindung mit einer ko-integrierten Sensormembran, d. h. einer Membran, die durch mikromechanische Rücksei-

² E²PROM oder EEPROM = Electrically Erasable Programmable Read-Only Memories, Elektrisch löscht- und programmierbare Nur-Lese Speicher



▲ **Abb. 5: Zwei-Chip Mikrosystem-Gehäuse mit extrem kleinem Drucksensor (Silicon Microstructures SM5108) und anwendungsspezifischer integrierter Schaltung, in diesem Fall einer Signalverarbeitungsschaltung für einen Seitenairbag-Drucksensor**
Fig. 5: Two-chip microsystem package combining an ultra small pressure sensor (Silicon Microstructures SM5108) with an application specific integrated circuit, in this case a side airbag pressure sensor signal conditioning circuit

wie vor angelegter Spannung wird die Beweglichkeit der Natriumionen wieder reduziert, was zu einer dauerhaften Verbindung des Glas- und des Siliziumwafers durch elektrostatische Anziehungskräfte führt.

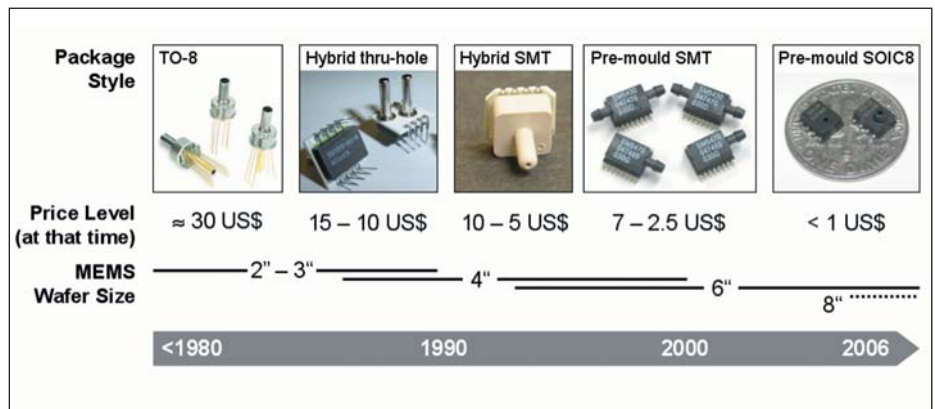
Seit etwa 2000 steht das plasmaunterstützte Niedrigtemperatur-Direktbonden (low-temperature plasma-enhanced fusion bonding) als alternative Technologie zur dauerhaften Verbindung zweier Siliziumwafer kommerziell zur Verfügung. Dabei wird ein Plasma zur Aktivierung der Siliziumoberflächen eingesetzt, was eine dauerhafte Verbindung der beiden Siliziumwafer bei einer signifikant verringerten thermischen Belastung ermöglicht und das thermische Budget der komplexen elektrischen Schaltungsstrukturen entlastet.

Der Fortschritt bei den Gehäusetechnologien zeigt sich anschaulich durch den Trend zur Miniaturisierung, die Entwicklung der verwendeten Materialien von Keramiksubstraten hin zu Standardmaterialien, wie sie auch beim Verpacken integrierter Schaltungen verwendet werden (Duroplast-Kunstharze und Kupfer-Leadframes), verbunden mit vereinfachten Verpackungsprozessen und einer Tendenz

hin zu SMD-Gehäusen, die nicht nur das Sensorelement, sondern auch die dazugehörige Signalverarbeitungselektronik enthalten und damit Mikrosystemgehäuse darstellen. Moderne Die Attacher erlauben die vollständige Rückverfolgbarkeit von Bauteilen auf Wafer- oder sogar auf Chipebene für solche Multi-Chip-Systeme. Automatische Testmaschinen ermöglichen die datentechnische Zuordnung von Testergebnissen und Kalibrierinformationen zu individuellen Bauelementen sowie Speicherung und Wiederauffindung dieser Daten auch noch nach Jahren – eine kritische Anforderung für qualitätssensitive Anwendungsbereiche wie den Automobilmarkt. Alle Gehäuseansätze werden jedoch durch die Tatsache begrenzt, dass letztlich direkter Zugang des Druckmediums zum Sensorelement erforderlich ist. Dies bedeutet, dass Ansatzrohre (für die Verbindung von Schlauchlei-

teme zur Verfügung und sind RoHS-kompatibel. Dies macht die Verwendung von Drucksensoren in einer Schaltung beinahe so einfach wie den Einsatz jedes beliebigen anderen Bauelements.

In den letzten 20 Jahren erfolgte ein gewaltiger Fortschritt in Entwicklung und Anwendung von siliziumbasierten Drucksensoren im Hinblick auf Leistungsfähigkeit, Größe, Kosten und Anwendbarkeit. Flächen- und kosteneffiziente MEMS-Fertigungstechnologien, gut charakterisierte und reproduzierbare elektrische Schnittstellen und angepasste integrierte Schaltungen zur Signalverarbeitung oder Ko-Integration von Sensoren sowie die Verfügbarkeit von massenproduktionsfähigen SMD-Gehäusen erlauben jetzt den Einsatz von Drucksensoren in vielerlei Anwendungen in Volumenproduktion. Zahlreiche Indikatoren deuten darauf hin, dass der Markt für



▲ **Abb. 6: Entwicklung von Drucksensorgehäusen, Bauelementpreisen und MEMS-Wafergrößen von den 80er Jahren bis heute**
Fig. 6: Development of pressure sensor packages, part price levels, and MEMS wafer sizes from the 1980s to today

tungen) oder Öffnungen und Vertiefungen für den Druckzugang unvermeidlich sind und die Freiheitsgrade für den Gehäuseentwickler einschränken. Weitere Herausforderungen sind die Verpackung auf Modulebene und die Abdichtung, da auch hier unkontrolliert eingekoppelte mechanische Spannungen zu negativen Einflüssen auf die Sensorgenauigkeit führen können. SMD-Gehäuse stehen heute normalerweise gegurtet und geeignet für automatische Leiterplattenbestückungssys-

teme zur Verfügung und sind RoHS-kompatibel. Dies macht die Verwendung von Drucksensoren in einer Schaltung beinahe so einfach wie den Einsatz jedes beliebigen anderen Bauelements.

Autor:
 Dr.-Ing. Dirk O. Keck
 ELMOS Semiconductor AG
 Heinrich-Hertz-Str. 1
 44227 Dortmund
 Tel.: 02 31/7549-0
 Fax: 02 31/7549-149
 E-Mail: info@elmos.de
 www.elmos.de