

# SENSOREN – AKTUELLER STAND UND HERAUSFORDERUNGEN

Peter Hauptmann, Ralf Lucklum

*Sensoren sind Basiselemente, um Informationen aus der Umgebung aufzunehmen und elektronisch weiterzuverarbeiten. Sie haben wesentlich die innovativen Entwicklungen in den zurückliegenden 15 Jahren bestimmt. An ausgewählten Beispielen wird das komplexe Gebiet der Sensorik dargestellt und die Bedeutung von Sensoranwendungen in unterschiedlichsten Bereichen gezeigt. Eigene Beiträge zu resonanten Sensoren werden dargestellt. Dabei stehen Ultraschallsensoren und akustische Mikrosensoren im Mittelpunkt. Sensoren werden auch in der Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Deshalb werden Trends abgeschätzt.*

## ZUR DEFINITION SENSOR UND DESSEN GESCHICHTLICHER ENTWICKLUNG

Sensoren sind informationserfassende technische Elemente, die ein elektrisches Ausgangssignal liefern. Häufig sind sie das erste Element einer informationsverarbeitenden Kette (Abb. 1). In der sensornahen Elektronik erfolgt die Signalauf- und Weiterverarbeitung der teils geringen, veräuschten oder zeitlich schwankenden Sensorsignale. Die meisten Sensoren liefern analoge elektrische Ausgangssignale. Um den Zugang zur digitalen Signalverarbeitung herzustellen, ist die Analog-Digital-Wandlung der Signale häufiger Bestandteil der informationsverarbeitenden Kette. Der Kreis schließt sich, wenn über einen Aktor eine aus dem Sensorsignal abgeleitete Reaktion auf das Messobjekt erfolgt. Man spricht von einem intelligenten Sensor-Aktor-System. Viele Anwendungen in der Prozessindustrie, der Pharmazie, in der Konsumgütertechnik oder in der Fahrzeugtechnik nutzen diesen Systemaspekt. Die geschlossene Kette spielt auch in der so genannten Mikrosystemtechnik eine ganz wichtige Rolle mit dem Unterschied, dass die einzelnen Elemente, wie der Begriff ausdrückt, Abmessungen im Mikrometerbereich haben. Der Systemaspekt soll aber im Folgenden nicht Gegenstand der Ausführungen sein, sondern seine primäre Komponente, der Sensor.

Der technische Begriff Sensoren lehnt sich an die menschlichen sensorischen Fähigkeiten Sehen, Riechen, Hören, Schmecken, Tasten an. In vielen Fällen übertreffen technische Sensoren die sensorischen Fähigkeiten des Menschen, in anderen Fällen sind sie noch weit davon entfernt. Sensoren beschränken sich jedoch nicht auf den Bereich, der den menschlichen Sinnesorganen direkt zugänglich ist. So gibt es optische Sensoren für den ultravioletten (UV)- und infraroten (IR)-Bereich, Ultraschallsensoren oder Sensoren für das giftige, geruchslose CO.

Sensoren basieren auf physikalischen und chemisch/biologischen Wirkprinzipien. Man unterteilt folglich in mechanische, magnetische, optische, thermische, Strahlungs- und chemisch/biologische Sensoren [1]. Die physikalischen Sensoren nutzen physikalische Wand-

lungsprinzipien und können auf ca. 100 zu detektierende Größen zurückgeführt werden. Als Beispiele seien die physikalischen Größen Kraft, Druck, Beschleunigung, Drehzahl, Abstand, Durchfluss oder Viskosität genannt.

**C h e m i s c h e**  
Sensoren dienen zum Nachweis bestimmter Analyten in gasförmigen oder flüssigen Medien. Eine Wechselwirkung an der Oberfläche oder im Innern des Sensormaterials,

die durch die chemischen Eigenschaften sowohl des Analyten als auch des Sensormaterials bestimmt wird, führt typischerweise zur Änderung physikalischer Größen im Sensor. Beispiele sind der elektrische Widerstand oder die elektrische Kapazität, die Temperatur oder die Masse. So einfach das Prinzip dieser Sensorklasse zu sein scheint, so kompliziert ist die technische Umsetzung. Häufig wechselwirkt nicht ein Analyt allein mit dem Sensor. Es kommt dann zu so genannten Querempfindlichkeiten. Ein anderes Problem sind chemische Vergiftungen, die die Langzeitstabilität negativ beeinflussen. Biologische Sensoren nutzen vorrangig die spezifischen Eigenschaften von Proteinen. Am bekanntesten sind Enzymreaktionen und Antigen-Antikörper-Wechselwirkungen, die sich durch eine hohe Selektivität auszeichnen. Die Entwicklung auf diesem Gebiet hat in jüngster Zeit wieder einen deutlichen Auftrieb erfahren. Im Gegensatz zu physikalischen Sensoren ist bei chemisch/biologischen Sensoren die Zahl der zu detektierenden Spezies nicht auf überschaubar wenige eingrenzbar. Daraus ergeben sich ständig neue Ansätze für die Entwicklung neuer Sensoren.

Die ersten Aktivitäten, Sensoren zu entwickeln, gehen auf die 60er Jahre des vergangenen Jahr-

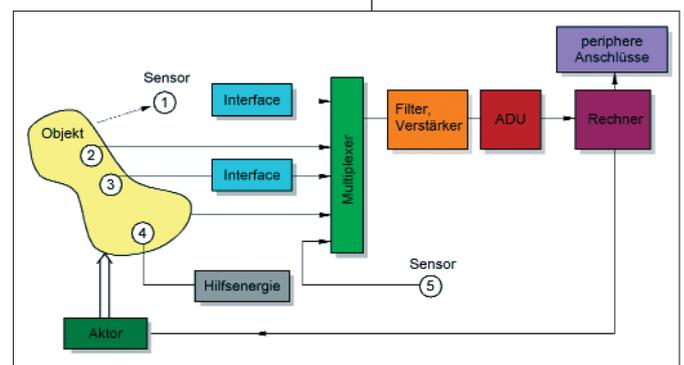


Abbildung 1  
Verschiedene Sensoren in  
einem Datenerfassungs- und  
Verarbeitungssystem  
Sensor 1 – nicht berührend  
Sensoren 2, 3 – passiv  
Sensor 4 – aktiv  
Sensor 5 – intern im Verar-  
beitungssystem

Produkt	Entdeckung	Produkt- evolution	Kosten- reduzierung	Volle Kommer- zialisierung
Drucksensoren	1954-1960	1960-1975	1975-1990	1990
Beschleunigungssensoren	1974-1985	1985-1990	1990-1998	1998
Drehratensensoren	1982-1990	1990-1996	1996-2002	2002
Gassensoren	1986-1994	1994-1998	1998-2005	2005

Tabelle 1  
Geschichtliche Entwicklung  
ausgewählter Sensortypen

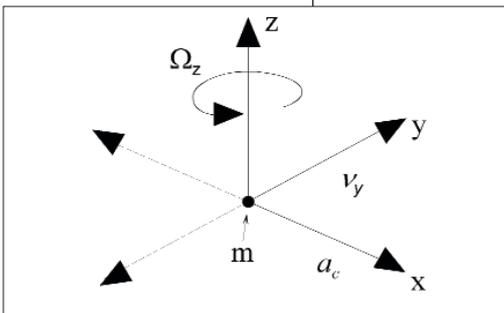


Abbildung 2  
Zusammenhang zwischen  
Drehrate  $\Omega_z$ , Geschwindigkeit  
der Schwingbewegung  $v_y$ , und  
Coriolis-Beschleunigung  $a_c$  an  
einer Punktmasse  $m$

hundreds zurück. In Tabelle 1 sind einige ausgewählte Beispiele aufgelistet, die wichtige Etappen dieses heute so innovationsträchtigen Gebietes veranschaulichen. Neben dem Zeitrahmen der Entdeckung des Prinzips oder Verfahrens werden gleichzeitig Zeiträume für die Produktevolution, die Kostenreduktion und die volle Kommerzialisierung angegeben. Die Daten basieren auf Ausführungen in Grace et al. /2/ und unterliegen natürlich subjektiven Betrachtungsweisen. Es sind aber wichtige

Schlussfolgerungen ableitbar. Die primären Aktivitäten beschäftigten sich mit der Erforschung von Drucksensoren, weil man die sich entwickelnde Silizium-Technologie auch für andere Anwendungen als die Entwicklung integrierter Schaltkreise nutzen wollte. Die Herstellung von dünnen Membranen, das Aufbringen von elektrischen Widerständen und die Integration einfacher Elektronik war mit den Technologien der Mikroelektronik machbar. Es hat aber fast 30 Jahre gedauert, bis sich Drucksensoren auf Si-Basis als Massensensor auf dem Markt etabliert haben. Ähnlich ist es mit anderen Massensensoren. Bei Nischenprodukten sind diese Zeiträume kürzer. Sie haben aber nicht die herausragende wirtschaftliche Bedeutung. Die Entwicklung neuer Sensoren bis zu deren Anwendung ist demzufolge oft ein langwieriger und auch kostenintensiver Prozess. Durch Nutzung neuer Technologien, Entwicklung neuer Materialien oder neue Hard- und Software kann dieser Prozess verkürzt werden. Häufig spielt natürlich auch die Marktsituation eine entscheidende Rolle.



1 Rotational speed sensor 2 Knock sensor 3  
Temperature sensor 4 Air flow sensor 5/6  
Pressure sensors 7 Side airbag sensor  
8 Acceleration sensor 9 Yaw rate sensor

Abbildung 3  
Kommerzielle Bosch-Sensoren  
für Anwendungen im  
Auto

Der Sensor-Weltmarkt erfuhr in den letzten zehn Jahren ein durchschnittliches Umsatz-Wachstum

von 8,5 Prozent /3/ und wird gegenwärtig auf ca. 30 bis 35 Milliarden Euro geschätzt. Für die nächsten zehn Jahre wird nach Befragungen von Sensorherstellern ein durchschnittliches Wachstum von 11 Prozent, von Optimisten sogar 20 Prozent, erwartet. Sensoren spielen neben den klassischen Anwendungsgebieten, wie in der Prozessindustrie, der Fahrzeugtechnik, der Umwelttechnik, der Militärtechnik und anderen, zukünftig eine überdurchschnittlich wichtige Rolle auf Gebieten wie der Gebäudetechnik, der Sicherheitstechnik, der Medizintechnik, der Haushaltstechnik, der Verkehrstechnik. Forschungsaktivitäten zu Sensoren sind folglich wirtschaftlich äußerst sinnvoll und wissenschaftlich spannend.

#### MOMENTANE SITUATION, DARGESTELLT AN AUSGEWÄHLTEN BEISPIELEN *Mechanische Sensoren*

Sensoren zur Bestimmung mechanischer Größen gehören zu den ausgereiftesten Sensorentwicklungen. In Abbildung 3 sind neben dem Drehratensensor nebst Elektronik (Sensor 9) andere kommerzielle mechanische Sensoren für Anwendungen im Auto dargestellt. Von der produzierten Stückzahl her und wertmäßig gesehen stehen Sensoren für Druck, Durchfluss, Beschleunigung, Drehzahl, Abstand, Position weltweit an der Spitze. Wesentliche Gründe dafür waren die Anforderungen beispielsweise von Seiten der Auto- oder Prozessindustrie, zuverlässige, empfindliche und preisgünstige Sensoren zur Messung derartiger Größen bereitzustellen.

Ein Beispiel soll dies demonstrieren. In Fahrzeugen mit elektronischem Stabilitätsprogramm ESP zur Fahrdynamikregelung muss die Drehbewegung eines Fahrzeuges um seine Hochachse, z. B. bei gewöhnlichen Kurvenfahrten oder beim Ausbrechen bzw. Schleudern, erfasst werden. Dies kann man mit Drehratensensoren realisieren. Der klassische mechanische Kreisel (engl.: Gyrometer) nutzt Trägheitskräfte, um unabhängig von Bezugssystemen im Raum Winkelbewegungen präzise zu erfassen. Auf der Basis eines faseroptischen Sagnac-Interferometers ist dies ebenfalls hochgenau möglich. Letztere werden in Flugzeugen zur Erfassung von Richtungsänderungen eingesetzt. Für Anwendungen im Auto sind beide zu teuer, das Gyrometer ist zudem zu groß. Der Ausweg waren feinmechanische und neuerdings mikromechanische Sensoren. Bei ihnen werden die gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten wie bei den Gyrometern ausgenutzt, nämlich der Zusammenhang zwischen Drehrate  $\Omega_z$ , Schwingbewegung  $v_y$  und Coriolis-Beschleunigung  $a_c$  (Abbildung 2). Es gilt

$$\vec{a}_c = \vec{a}_x = 2 \cdot (\vec{v}_y \times \vec{\Omega}_z) \quad (1)$$

Die Geschwindigkeit  $v_y$  ändert sich entsprechend einer vorgegebenen harmonischen Schwingbewegung.

Bei konstanter Drehrate  $\Omega_z$  wird damit auch eine sinusförmige Coriolis-Beschleunigung  $a_c$  gleicher Frequenz- und Phasenlage mit dem

Amplitudenwert

$$\hat{a}_c = 2 \cdot \hat{v}_y \cdot \Omega_z \quad (2)$$

gemessen. Diese Beschleunigung kann ein mitfahrender Beobachter erfassen und messen.

Um die Drehrate zu erfassen, wird die Geschwindigkeitsamplitude  $\hat{v}_y$  der Schwingbewegung mittels einer geeigneten Regelung auf einem konstanten Wert gehalten und die Coriolis-Beschleunigung der schwingenden Masse phasen- und frequenzselektiv gemessen. Damit wird das Beschleunigungssignal auch von Störbeschleunigungen wie Karosseriebeschleunigungen befreit. Es ergibt sich ein elektrisches Signal

$$U_a \approx \hat{a}_c \approx k \cdot \Omega_z \quad (3),$$

das proportional zur Drehrate ist. Die ebenfalls an der Masse angreifende Beschleunigung in y-Richtung ist dem Betrag nach um mehrere Zehnerpotenzen größer als die Coriolis-Nutzbeschleunigung. Der verfälschende Einfluss von  $a_y$  wird jedoch durch die Richtungsselektivität des Coriolis-Beschleunigungs-Sensors und die phasenrichtige Gleichrichtung des Coriolis-Signals unterdrückt. In Abbildung 4 ist ein mikromechanischer Si-Drehratensensor dargestellt, der für die erforderliche hohe Genauigkeit in Si-Mischtechnologie hergestellt wurde. So genannte Volumen- oder Bulk-mikromechanik und Oberflächenmikromechanik wurden verwendet. Zwei dickere, mittels Bulk-mikromechanik aus einem Wafer herausgearbeitete plattenförmige Schwingkörper (4) schwingen im Gegenteil in ihrer Resonanzfrequenz. Letztere wird durch die Masse des Schwingkörpers und die

Steifigkeit der Koppelfeder (1) bestimmt und liegt oberhalb von einigen Kiloherz. Jeder Schwingkörper ist mit einem oberflächenmikromechanisch gefertigten, kapazitiven Beschleunigungssensor (5) kleinster Abmessung verbunden, der die Coriolis-Beschleunigung in der Wafer-ebene senkrecht zur Schwingrichtung erfasst, wenn sich der Sensorchip mit der Drehrate  $\Omega$  um seine Hochachse dreht. Zum Antrieb dient eine stromführende Leiterbahn auf den Schwingplatten (nicht dargestellt), die in einem Feld  $B$  senkrecht zur Chipfläche eine Lorentz-Kraft erfährt. Gleichzeitig wird die Schwinggeschwindigkeit mittels der in einem weiteren einfachen Leiter unter Nutzung des Magnetfeldes induzierten Spannung gemessen. Antriebs- und Sensorsystem sind vollständig voneinander entkoppelt. An diesem Beispiel kann beeindruckend verdeutlicht werden, wie rasant sich das Sensorgebiet in den vergangenen Jahren entwickelt hat. Erst durch Nutzung verschiedener Si-Technologien werden diese komplizierten Sen-

soren herstellbar. In Verbindung mit hybrider oder integrierter Elektronik, die sich in unmittelbarer Nähe zum Sensor befindet, wird die Steuerung, Regelung und Auswertung dieses Sensors, der in der Realität ein kompliziertes System darstellt, gewährleistet.

### Magnetische Sensoren

Außer der physikalischen Größe Drehrate gibt es eine Vielzahl anderer mechanischer Größen, die für mannigfaltige technische Anwendungen, nicht nur in der Fahrzeugindustrie, sondern auch im Maschinenbau, der Anlagentechnik, der Konsumgüterindustrie und anderen Bereichen enorm wichtig sind. Zu deren Messung wird oft ein klassisches magnetisches Sensorprinzip, der Hall-Sensor, erfolgreich eingesetzt. Hall-Sensoren sind galvanomagnetische Sensoren. Bei ihnen wird ein dünnes, stromdurchflossenes Halbleiterplättchen senkrecht von einer äußeren magnetischen Induktion  $B$  durchsetzt (Abbildung 5). Dadurch kann quer zur Stromrichtung eine zum Feld proportionale elektrische Spannung  $U_H$ , die so genannte Hall-Spannung

$$U_H = \frac{R_H}{d} I_0 B \quad (4)$$

abgegriffen werden (Hall-Effekt).  $R_H$  ist der so genannte Hall-Koeffizient, eine stoffspezifische Konstante. Ihre Größe wird durch die Ladungsträgerkonzentration im Halbleiterplättchen bestimmt. Sie ist neben den geometrischen Parametern und der Ladungsträgerbeweglichkeit entscheidend für eine hohe Empfindlichkeit des Sensors.  $I_0$  ist der Strom durch das Plättchen. Gleichzeitig vergrößert sich unter dem  $B$ -Einfluss der Plättchenwiderstand nach einer etwa parabelförmigen Kennlinie (Gauß-Effekt). Dies wird in den so genannten Feldplatten für sensorische Zwecke genutzt.

Wird in Hall-Sensoren Silizium als Grundmaterial verwendet, bietet dies den Vorteil, dass gleichzeitig Signalaufbereitungsschaltungen monolithisch integriert werden können. Da die Hall-Spannung im Allgemeinen klein ist, nämlich im mV-Bereich, können dies Verstärkerschaltungen sein. Analoge lineare Hall-Sensoren werden so aufgebaut. Wird ein digitales Ausgangssignal bevorzugt, kann dies durch eine zusätzliche integrierte Triggeranordnung erfüllt werden (Abbildung 6).

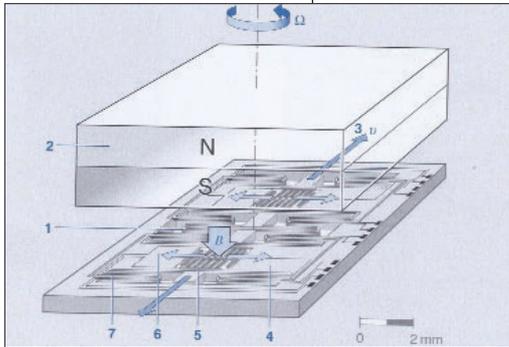


Abbildung 4  
Mikromechanischer Drehratensensor (Bosch MM1)  
1 Koppelfeder  
2 Dauermagnet  
3 Schwingrichtung  
4 Schwingkörper  
5 Coriolis-Beschleunigungssensor  
6 Richtung der Coriolis-Beschleunigung  
7 Halte-/Führungsfeder  
 $\Omega$  Drehrate  
 $v$  Schwinggeschwindigkeit  
 $B$  dauer magnetisches Feld

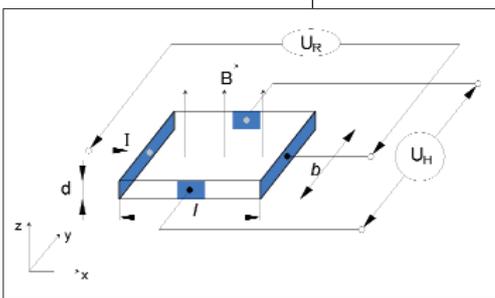


Abbildung 5  
Anordnung zur Erfassung der galvanomagnetischen Effekte

um seine Hochachse dreht. Zum Antrieb dient eine stromführende Leiterbahn auf den Schwingplatten (nicht dargestellt), die in einem Feld  $B$  senkrecht zur Chipfläche eine Lorentz-Kraft erfährt. Gleichzeitig wird die Schwinggeschwindigkeit mittels der in einem weiteren einfachen Leiter unter Nutzung des Magnetfeldes induzierten Spannung gemessen. Antriebs- und Sensorsystem sind vollständig voneinander entkoppelt. An diesem Beispiel kann beeindruckend verdeutlicht werden, wie rasant sich das Sensorgebiet in den vergangenen Jahren entwickelt hat. Erst durch Nutzung verschiedener Si-Technologien werden diese komplizierten Sen-

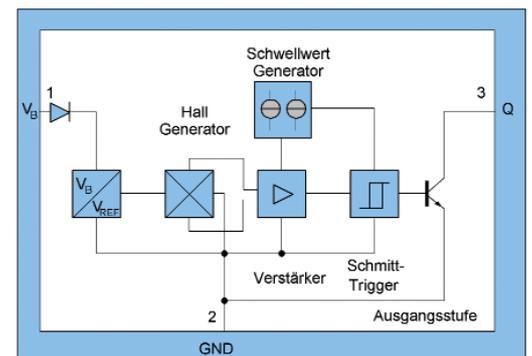


Abbildung 6  
Blockschaltbild eines integrierten digitalen Hall-Sensors

Bezüglich Messempfindlichkeit und Temperaturgang ist Silizium jedoch bei weitem nicht das empfindlichste Halbleitermaterial für Hall-Sensoren. Deswegen wird auch Galliumarsenid in kommerziellen Hall-Sensoren verwendet.

Hall-Sensoren können je nach Anwendung in zwei Gruppen eingeteilt werden.

- in Sensoren, die indirekt aus dem Magnetfeld eine Information über eine andere Größe entnehmen,
- in Sensoren, die direkt ein Magnetfeld messen.

Zur ersten Gruppe gehören all die Sensoren, mit denen aus einer Magnetfeldänderung auf andere Größen wie Drehzahl, Abstand, Position, Winkel geschlossen werden kann. Sie sind wichtige Sensoren zur Bestimmung dieser mechanischen Größen und werden deshalb weltweit in Millionen von Stückzahlen produziert. Genauso kann mit diesen Sensoren aus dem Magnetfeld eine Information über einen Strom erhalten werden. Sie werden dann als Stromsensoren eingesetzt.

Die zweite Gruppe wird zur Bestimmung biomagnetischer Felder, des Erdfeldes oder der Felder von Maschinen und Anlagen eingesetzt. Zu großer Bedeutung gelangte im letzten Jahrzehnt der Einsatz von analogen Hall-Sensoren in kollektorlosen Gleichstrommotoren. Hall-Sensoren liefern aus der Höhe und Polarität der Hall-Spannung eine Information über die Stellung des Läufers. Der Strom in den Wicklungen wird daraufhin elektronisch gesteuert. Solcherart ausgerüstete Motoren zeichnen sich durch hohe Rundlaufleistungen aus und werden im HiFi- und Videobereich angewendet.

Zu den galvanomagnetischen Sensoren gehören auch die so genannten magnetoresistiven Sensoren. Bei ihnen wird unter Einfluss eines äußeren Magnetfeldes der elektrische Widerstand in einer ferromagnetischen Dünnschichtlegierung geändert. Man spricht vom so genannten Magnetowiderstandseffekt. Diese Sensoren sind technologisch gut reproduzierbar herstellbar, sind äußerst empfindlich und liefern große Ausgangssignale. Neben der Anwendung als Sensor zur Strom-, Drehzahl- und Winkelmessung werden sie auch im so genannten elektronischen Kompass eingesetzt. Wie eng Material- und Sensorentwicklung miteinander verknüpft sind, zeigt ein erst seit wenigen Jahren auf dem Markt angebotener magnetischer GMR (Giant Magnetoresistance)-Sensor. Er nutzt einen physikalischen Effekt, der Ende der 80er Jahre in einem Stapel von Angström (0,1 nm) dicken Schichten aus Eisen und Chrom entdeckt wurde [4]. Dieser Schichtenstapel, in der Regel zwischen 10 und 20 Schichten, reagiert mit besonderer Empfindlichkeit gegenüber Magnetfeldern. Widerstandsänderungen bis zu 50 Prozent wurden beobachtet. Nach der Entdeckung dieses Effektes sind zahlreiche Forschungsaktivitäten initiiert worden, um diesen Effekt für neue Speicher-materialien zu nutzen. Seine Nutzung als Sensor-material erregte eher untergeordnete Aufmerksamkeit. Heute ist er die Basis für magnetische Winkelsensoren, mit denen eine eindeutige Bestimmung des Drehwinkels über volle 360° möglich ist

[5]. Kontaktlose potentiometrische Sensoren werden daraus hergestellt.

### Chemische Sensoren

Chemische Sensoren spielen in vielen Bereichen eine dominante Rolle. Als Beispiele seien die Umwelttechnik, die Chemie- und Pharmaindustrie, die Medizin-, die Sicherheits- und Kfz-Technik angeführt. Durch die Rolle der Chemie als eine der dominierenden Wissenschaftsdisziplinen des vergangenen Jahrhunderts spielten chemische Sensoren schon in der Startphase der technischen Sensorentwicklung eine wichtige Rolle. Trotzdem gibt es heute im Prinzip nur zwei chemische Sensoren, die man als Massensensoren bezeichnen kann. Das sind einmal die Metalloxidsensoren. Bei höheren Temperaturen zeigt ihr elektrischer Widerstand eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Konzentration bestimmter Gase. Metalloxide mit n-Typ-Elektronenleitung, wie  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  oder  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sprechen bei Temperaturen zwischen 200 °C und 500 °C vornehmlich auf oxidierbare Gase wie  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  oder  $\text{H}_2\text{S}$  an und erhöhen dabei ihre Leitfähigkeit.

Andere Metalloxide mit p-Typ-Leitung reagieren vor allem auf reduzierbare Gase. Historisch gesehen waren polykristalline Metalloxidsensoren die ersten homogenen Gassensoren. Der bekannteste von ihnen ist der in großen Stückzahlen von der japanischen Firma Figaro produzierte so genannte „Taguchi-Gassensor“ (TGS) auf der Basis von  $\text{SnO}_2$ . In Japan sind sie in vielen Haushalten als Feuerwarnsystem installiert. Festelektrolytsensoren nehmen eine Sonderstellung unter den chemischen Sensoren ein. Sie nutzen die Eigenschaft bestimmter Ionenkristalle, bei erhöhter Temperatur den elektrischen Strom in Form von Ionen zu transportieren. Zwei Grundanordnungen werden unterschieden, die potentiometrische und amperometrische. Der Arbeitsweise potentiometrischer Festelektrolytsensoren liegt die Nernstsche Gleichung zugrunde:

$$U = \frac{RT}{4F} \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right) \quad (5),$$

mit  $R$  der Gaskonstanten,  $F$  der Faradaykonstanten und  $T$  der Temperatur.  $p_1$ ,  $p_2$  sind die Partialdrücke an den jeweiligen Elektroden. Es wird eine Zellspannung  $U$  erhalten, die proportional zum Logarithmus des Partialdruckes der zu messenden Komponente ist. Diese Sensoren sind geeignet, einen breiten Messbereich zu überstreichen. Sie haben einen Arbeitstemperaturbereich zwischen 100 °C und 2 000 °C je nach Festelektrolytmaterial. Solche Sensoren sind vor allem für die in-situ-Prozessmesstechnik geeignet.

Das prominenteste Beispiel von Festelektrolytsensoren ist der  $\text{O}_2$ -Sensor auf der Basis

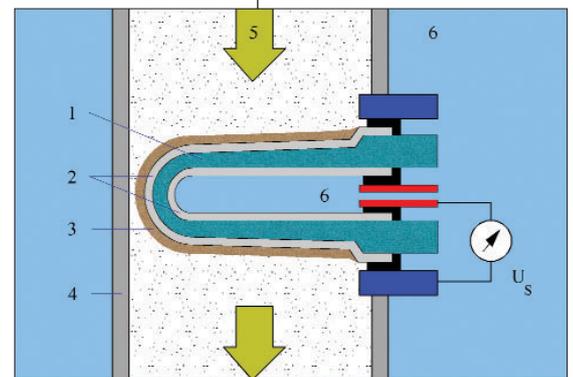


Abbildung 7  
Lambda-Sonde im Abgasrohr  
1 Sondenkeramik  
2 Elektroden  
3 Schutzschicht  
4 Abgasrohr  
5 Abgas  
6 Außenluft

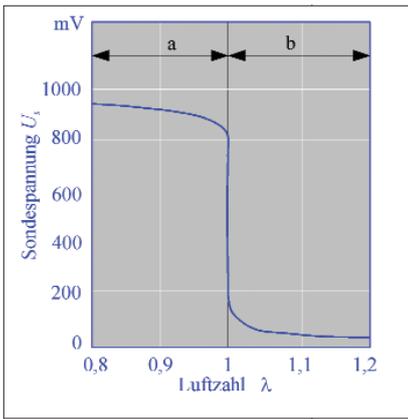


Abbildung 8  
Kennlinie Zweipunkt-  
Lambda-Sonde  
a) fettes Gemisch  
b) mageres Gemisch

Yttrium-dotierten  $ZrO_2$ . Er wird zur Messung des  $O_2$ -Partialdruckes in Autoabgasen und zur Regulierung des Kraftstoff-Luft-Gemisches für den optimalen Katalysatoreinsatz verwendet. Man spricht dann von der  $\lambda$ -Sonde. Seit Mitte der 70er Jahre sind weltweit viele Millionen Lambda-Sonden im Einsatz. Abbildung 7 zeigt den Aufbau solch einer Sonde. Die Keramik ist beidseitig mit einem porösen Katalysator aus Platin beschichtet. Zur Fernhaltung von Verunreinigungen ist die dem Abgase zugewandte Elektrode mit einer porösen Keramikschiicht abgedeckt. Das Luft-Kraftstoffverhältnis ist definiert durch

$$\lambda = \frac{\text{zugeführte Luftmenge}}{\text{theoretischer Luftbedarf}} \quad (6).$$

$\lambda=1$  entspricht genau der stöchiometrischen Mischung aus Sauerstoff und Kraftstoff. In diesem Fall liegt eine ideale Verbrennung vor.  $\lambda < 1$  bedeutet fettes,  $\lambda > 1$  mageres Gemisch. In Abbildung 8 ist die Kennlinie einer Zweipunkt-Lambda-Sonde dargestellt. Der sprunghafte Verlauf der Kennlinie bei  $\lambda=1$  erlaubt eine einfache Gemischregelung auf diesen Wert. Die notwendige Arbeitstemperatur der Sonde von einigen Hundert Grad Celsius wird durch das heiße Abgas geliefert. Es ist leicht vorstellbar, dass beim Starten eines Autos diese Temperatur nicht sofort erreicht wird. Es wurden deshalb beheizte Sonden entwickelt. Neuere  $\lambda$ -Sonden werden planar aufgebaut, d. h. der Festelektrolyt besteht aus einzelnen, aufeinander laminierten keramischen Folien mit integrierter Heizung.

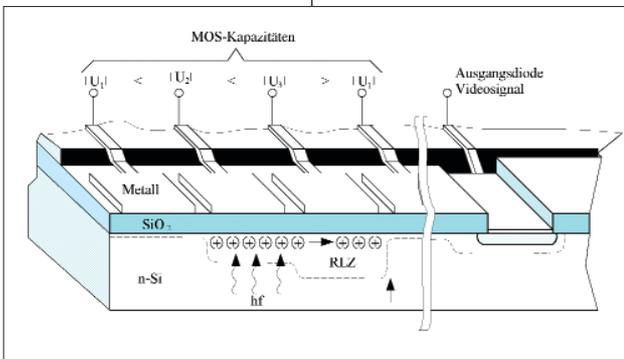


Abbildung 9  
Schematischer Aufbau eines  
CCD

Durch Kopplung eines potentiometrischen mit einem amperometrischen Sensor sind so genannte planare Breitband-Lambda-Sonden herstellbar. Sie liefern im Bereich  $0,7 < \lambda < \infty$  ein eindeutiges, stetiges elektrisches Signal. Es kann damit die Sauerstoffkonzentration im Abgas in einem weiten Bereich bestimmt und auf  $\lambda$  im Brennraum geschlossen werden.

### Optische Sensoren

Optische Sensoren spielen im sichtbaren und IR (Infrarot)-Bereich eine wichtige Rolle. Bildfassende und -verarbeitende Verfahren haben gerade in den letzten Jahren eine große Bedeutung erlangt in der Automatisierungstechnik, in Konsumgütern, der Medizintechnik und anderen Gebieten. Neben den so genannten Photodioden und -transistoren spielen CCD-Anordnungen eine dominierende Rolle als selbstaulesende Bildsensoren. Das Prinzip

der Ladungskopplung (charge coupling) und daraus hergestellter Anordnungen (charge coupled devices-CCD) ist in Abbildung 9 dargestellt. In einer MOS-Struktur werden Minoritätsträger im lokalisierten Potentialtopf an einer Si-SiO<sub>2</sub>-Grenzschicht gesammelt und gespeichert. Die Minoritätsträger werden von absorbiertem Licht erzeugt. Die kapazitive Anordnung bezeichnet man als Pixel. Durch Anlegen geeigneter Spannungen an die Metallelektroden werden die Ladungen weitergeschoben. Am Ausgang liegt ein analoges Signal vor. Werden nun viele dieser CCDs in einer Zeile oder einem Array angeordnet, kann man eine linienhafte oder flächenhafte Bildinformation erhalten. Die vielen Anwendungen reichen von der Automatisierungstechnik bis in den privaten Bereich. Seit etwa fünf Jahren sind CMOS-CCDs auf dem Markt. Damit ist man in der Lage, die CCD-Elemente mit Auswerteelektronik zu integrieren und leistungsfähigere Sensoren herzustellen.

### Faseroptische Sensoren

Eine äußerst interessante Sensorkategorie sind die faseroptischen Sensoren. Es werden Multi- oder Monomodefasern verwendet. Beiden gemeinsam ist, dass das Licht im Kern der Faser weitergeleitet wird. Dabei wird die so genannte Totalreflexion beim Übergang von einem optisch dichteren zu einem optisch dünneren Medium ausgenutzt. Bei Multimodefasern mit einem Kerndurchmesser von ca. 100  $\mu\text{m}$  wird weißes Licht verwendet, bei Monomodefasern mit einem Kerndurchmesser von etwa 10  $\mu\text{m}$  ist Laserlicht im Einsatz. Für faseroptische Sensoren nutzt man verschiedene Effekte. Einmal kann die Faser nur als Übertragungsmedium des Lichtes genutzt werden, der sensorische Effekt passiert im Medium außerhalb oder gekoppelt mit der Faser. Glasfasertemperatursensoren mit fluoreszierenden Kristallen an der Faserspitze sind ein Beispiel hierfür. Man spricht von so genannten extrinsischen Sensoren. Sie werden an Orten mit starker elektromagnetischer „Verseuchung“ eingesetzt, wo andere Sensoren versagen. Als Beispiel sei die Anwendung in Mikrowellenöfen genannt. Bei den so genannten intrinsischen Sensoren werden die Fasereigenschaften durch Wirkungen von außen beeinflusst. Gerade Monomodesensoren nutzen den letztgenannten Effekt für äußerst empfindliche Sensoren mit extrem hoher Auflösung. Es werden dann interferometrische Verfahren angewendet. Hochpräzise Hydrophone oder Faserkreisel sind damit realisierbar. Faserkreisel auf der Basis des Sagnac-Effektes spielen heute eine dominierende Rolle in Flugzeugen und in Raketen, um Richtungsänderungen präzise zu erfassen. Faseroptische Sensoren sind aus vielerlei Sicht äußerst interessante Sensoren. Sie sind miniaturisierbar und unempfindlich gegenüber elektromagnetischer Einstrahlung, sie können über lange Strecken verlegt und somit z. B. für verteilte Sensoren genutzt werden. Diesen Vor-

teilen steht der Nachteil eines relativ großen elektronischen Aufwandes gegenüber. Das macht sie relativ teuer und somit scheinbar für Spezialanwendungen geeigneter.

**Thermische Sensoren**

Die Messung der Temperatur ist eine der wichtigsten Messaufgaben. Es ist unmöglich, mit einem Sensorprinzip die gesamte Temperaturskala abzudecken. Für den technisch wichtigen Bereich von etwa -50 °C bis 1 000 °C sind die klassischen Sensoren auf der Basis der Widerstandsänderung in Metallen oder Halbleitern die dominierenden. Pt-1000-Sensoren, hergestellt mit Dünnschichttechniken, und Thermistoren, so genannte NTC-Halbleitersensoren, stehen exemplarisch für diese Sensorklasse. IR-Systeme nutzen strahlungsoptische Prinzipien aus und können mit entsprechenden Sensoren äußerst empfindlich arbeiten. Prinzipiell sind thermische Sensoren etabliert. Spektakuläre Neuentwicklungen sind nicht abzusehen.

**RESONANTE SENSOREN – FORSCHUNGSARBEITEN AN DER UNIVERSITÄT MAGDEBURG**

Die meisten der am Markt zugänglichen Sensoren sind analoge Sensoren. Das am Ausgang eines Sensors vorliegende Signal muss folglich digitalisiert werden, um mit moderner Signalverarbeitungstechnik weiter bearbeitbar zu sein. Wünschenswert wären Sensoren mit digitalem Ausgangssignal. Dafür gibt es nur wenige Beispiele. Bestimmte inkrementale Weg- oder Winkelsensoren gehören dazu. Eine den digitalen Sensoren ähnliche Gruppe sind die so genannten resonanten Sensoren. Bei ihnen ist die Frequenz das nutzbare Sensorsignal, diese Sensoren werden auch frequenzanaloge Sensoren genannt. Frequenz und Zeit sind physikalische Größen, die einfach digitalisierbar sind. Es ist deshalb das Ziel vieler Sensorentwickler, Sensoren mit solchen Ausgangssignalen zu entwickeln. Das war auch eine wesentliche Motivation der Magdeburger Arbeiten. Eine zweite bestand darin, in Nischen neue Möglichkeiten für interessante Sensoranwendungen zu schaffen. Zwei Beispiele sollen dies veranschaulichen.

Resonante Sensoren können prinzipiell in zwei Kategorien unterteilt werden, in mechanische und akustische Sensoren. Bei den mechanischen Sensoren werden schwingungsfähige Elemente wie Zungen, Membrane, Stege oder ähnliche Strukturen in Resonanz gebracht. Neueste Entwicklungen nutzen Spitzen, die in der AFM (Atomkraftmikroskopie) schon lange angewendet werden und nun als Sensorelemente mit hoher Empfindlichkeit genutzt werden. Die Beobachtung und Detektion des Resonanzverhaltens liefert die Information über die zu ermittelnde Größe. Das kann eine mechanische, chemische oder optische Größe sein. Eigene Arbeiten wurden zu niederfrequenten resonanten Vibrationsensoren durchgeführt [6]. Die Erfassung von Lagerschäden war mit diesen Sensoren erfolgreich möglich.

Reflexionsverfahren	Phase Frequenz Amplitude	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abstand, Füllstand, Position, Schallgeschwindigkeit</li> <li>• Objektstruktur und -anwesenheit</li> <li>• Dichte, Viskosität, Konzentration</li> <li>• Bewegung, Geschwindigkeit (Dopplereffekt), Volumenstrom</li> </ul>
Transmissionsverfahren	Phase Amplitude	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konzentration in Mehrkomponentensystemen</li> <li>• Partikelgrößenverteilung in Suspensionen, Emulsionen</li> <li>• Volumen- und Massenstrom, Geschwindigkeit</li> <li>• Dichte, Viskosität</li> <li>• Temperatur</li> </ul>
Emissionsverfahren	Amplitude Frequenz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozessbeobachtung</li> </ul>

Zu den akustischen Sensoren werden die Ultraschallsensoren und die akustischen Mikrosensoren gezählt. Die Grundidee eines Ultraschallsensors ist einfach: Ultraschallwellen werden ausgesendet und nach ihrer Wechselwirkung mit dem zu untersuchenden Medium empfangen. Die Wellen tragen dann die Information über die zu messenden Parameter, z. B. über einen zu untersuchenden Prozess. Der Ultraschall umfasst den Bereich von 20 kHz bis etwa 1 GHz. Für technische Anwendungen ist der Bereich von 20 kHz bis 10 MHz interessant. Zwei Ultraschallparameter werden gemessen. Dies ergibt sich aus der Beschreibung der Ausbreitung harmonischer Wellen. Für den Schallwechseldruck gilt

$$p(x, t) = p_0 e^{j\omega(t - \frac{x}{c})} e^{-\alpha x} \tag{7}$$

mit der Kreisfrequenz  $\omega$ , der Schallgeschwindigkeit  $c$  und der Schallabsorption  $\alpha$ . Die Parameter  $c$  und  $\alpha$  bestimmen die Schallausbreitung in einem Medium.

Dritter medienspezifischer Parameter ist die Schallkennimpedanz  $Z$

$$Z = \rho c \tag{8}$$

Sie bestimmt den Übergang von Schallwellen an der Grenzfläche zwischen zwei Medien.  $\rho$  ist die Dichte des jeweiligen Mediums.

Für die Anwendbarkeit von Ultraschallsensoren ist es nun von eminenter Bedeutung, wie die den Anwender interessierenden Größen mit den genannten Parametern zusammenhängen. In Tabelle 2 sind die Ultraschallsensoren nach dem Mechanismus der Wechselwirkung von Prozessparametern und Schallwelle unterteilt. Prinzipiell werden drei Verfahren in der Praxis angewendet. Die aufgelisteten Anwendungsgebiete zeigen die Vielfalt der Nutzungsmöglichkeiten dieser Sensoren. Ein Beispiel für die erfolgreiche Anwendung von Schallgeschwindigkeitssensoren für die in-line-Konzentrationsmessung in Zwei- und Dreikomponentensystemen ist das Ultraschallkonzentrationsmesssystem der Firma Sensotech GmbH, einem spin-off der Otto-von-Guericke-Universität. Es ist in

Tabelle 2  
Einteilung der Ultraschallsensoren nach dem Mechanismus der Wechselwirkung von Prozessparameter und Schallwelle

Abbildung 10 dargestellt /7/. Arbeiten der letzten Jahre konzentrierten sich auf die Entwicklung eines Sensors zur Messung der Schallkennimpedanz eines fluiden Mediums. Im Gegensatz zur Schallgeschwindigkeits- und -absorptionsmessung muss das untersuchte Medium in diesem Fall nicht transparent sein, da die Information aus der Schallreflexion an der Grenzfläche zwischen einem Referenzmaterial und dem Medium gewonnen wird. In Abbildung 11 ist der Aufbau eines Ultraschall dichtesensors zur Lösung dieser Aufgabenstellung dargestellt /8/.

Systeme auf der Basis von Ultraschallsensoren haben sich bei der Abstands-, Füllstands- und Konzentrationsmessung am Markt durchgesetzt. Sie haben ein noch nicht ausgeschöpftes Potential bei der Teilchengrößenbestimmung in fluiden Systemen, wo optische Methoden versagen.



Abbildung 10  
Ultraschallkonzentrations-  
messsystem

Akustische Mikrosensoren beruhen auf der Änderung der Ausbreitung von akustischen Wellen im Sensor durch das zu untersuchende Medium, das an ihre Oberfläche grenzt. Sie sind empfindlich gegenüber angelagerter Masse, Dichte, Viskosität, Viskoelastizität und Leitfähigkeit. Ihre Einsatzbereiche liegen damit vorwiegend in der Chemie, Pharmazie, Medizin und Biotechnologie. Ein akustischer Mikrosensor besteht im Allgemeinen aus einem piezoelektrischen Material mit einer oder mehreren Elektroden an der Oberfläche. Es werden akustische Wellen im Bereich von 1 MHz bis einige 100 MHz erzeugt. In Abbildung 12 sind die am weitesten verbreiteten Sensoren dargestellt: Quartz Crystal Microbalance (QCM), Surface Acoustic Wave (SAW), Love Mode (LM), Flexural Plate Mode (FPM) und Shear Horizontal Acoustic Plate Mode (SH-APM). QCM-Sensoren arbeiten als Dicken-Scherschwinger im Bereich von 5 bis 100 MHz, SAW-Sensoren erzeugen Rayleigh-Wellen im Frequenzbereich von 30 bis 700 MHz, APM-Sensoren arbeiten im Bereich von 25 bis 200 MHz, FPM-Sensoren nutzen Lamb-Wellen im Frequenzbereich von 2 bis 7 MHz. Der Aufbau der Sensoren und ihr nutzbarer Frequenzbereich bestimmen die Einsatzmöglichkeiten

der Sensoren. Eigene Arbeiten konzentrieren sich auf QCM-Sensoren. Diese Sensoren haben eine lange Geschichte zur Messung der Dicke abgedeckter Schichten in Aufdampfanlagen, der Messbereich reicht von Angström bis Mikrometer. Theoretische Untersuchungen haben gezeigt, dass diese als Mikrowägung bezeichnete Methode ein wichtiger Sonderfall einer viel breiteren Einsatzpalette akustischer Mikrosensoren ist. Das „Acoustic Load“-Konzept zeigt dies in besonders überzeugender Weise. Danach erzeugt eine einzelne lastfreie Schicht auf dem Quarz eine akustische Last

$$Z_L = j\omega\rho_s h_s \frac{\tan\varphi_s}{\varphi_s} = jMV, \quad (9)$$

die im ersten Term von Gleichung 9 nach dem Beitrag von Masse und akustischer Phasenverschiebung trennt /10/. Es werden ein „mass factor“  $M = \omega\rho_s h_s$  und „acoustic factor“  $V = \tan\varphi_s/\varphi_s$  eingeführt, wobei  $\varphi_s$  eine Funktion der Dichte und des Schermoduls sowie der Dicke der Schicht  $s$  ist. Damit wird ein weit besserer Einblick über den Einfluss gravimetrischer und nicht-gravimetrischer Effekte auf das Sensorsignal gewonnen. Für die klassischen Anwendungen der QCM gilt  $V=1$ . Die neuen Anwendungen dieser Sensoren arbeiten bei  $V \neq 1$ . Dadurch wird der Zugang zu Materialparametern der an den Sensor angrenzenden Schicht oder deren Änderung eröffnet. In erster Linie interessieren viskoelastische Eigenschaften, beispielsweise eine durch Lösungsmittelabgabe oder Vernetzung hervorgerufene Härtung von Lackfilmen. Eine besondere Rolle werden stofflichen Eigenschaften und Grenzflächeneffekten bei Biosensoren zugemessen, die auf größere Moleküle (Proteine) und Einheiten (Liposome, Zellen) für den biochemisch determinierten Teil der Signalkette zurückgreifen. Neueste theoretische Arbeiten führen generalisierte akustische Parameter der Schichten ein /11/. Mit diesen Modellerfahrungen können das Sensordesign optimiert und gezielt Sensoreigenschaften erzeugt werden. Umfangreiche experimentelle Untersuchungen führten zur Umsetzung der theoretischen Modelle. Gemeinsam mit dem Institut für Automation und Kommunikation e. V. (ifak), einem An-Institut der Otto-von-Guericke-Universität, wurden komplette Messsysteme entwickelt, die diese Sensoren für unterschiedlichste Anwendungen, z. B. zum Nachweis von Kohlenwasserstoffen in wässrigen Medien, für Biosensoren, zur Viskositätsmessung nutzen. In Abbildung 13 sind Beispiele dargestellt.

Die industrielle Nutzung von akustischen Mikrosensoren steht erst am Anfang. Erste kommerzielle Sensoren, wie ein Sensor der Firma BOSCH zur Ölqualitätsbestimmung oder das auf der QCM-D-Technik beruhende Sensorsystem der Firma Q-Sense, erscheinen aber vielversprechend auf dem Markt. SAW-Gassensoren werden ebenfalls angeboten /9/.

#### TRENDS – VERSUCH EINER ABSCHÄTZUNG

Die am Anfang durchgeführte Analyse der geschichtlichen Sensorentwicklung zeigte, dass evolutionäre Entwicklungen dieses Gebiet bestimmen. Das wird sicher auch in der Zukunft so sein. Die zukünftigen Trends sollen aus zwei Blickwinkeln betrachtet werden. Eine ist die Anwendersicht. Aus deren Sicht sind klassische

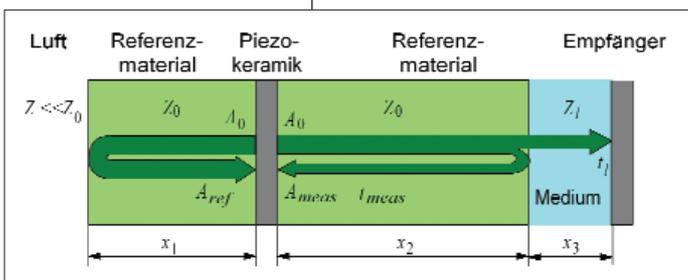


Abbildung 11  
Aufbau eines Ultraschall-  
dichtesensors

Untersuchung von flüssigen Systemen eingesetzt.

Eigene Arbeiten konzentrieren sich auf QCM-Sensoren. Diese Sensoren haben eine lange Geschichte zur Messung der Dicke abgedeckter Schichten in Aufdampfanlagen, der Messbereich reicht von Angström bis Mikrometer. Theo-

Performance, Miniaturisierung, Intelligenz, Integration, Standardisierung und Kosten die wichtigsten Kriterien /3/. Was bedeuten diese im Einzelnen:

- **Klassische Performance:** Auf Grund technologischer Fortschritte werden die klassischen Performance-Parameter wie Messunsicherheit, Lebensdauer, Zuverlässigkeit weiter verbessert. Fähigkeiten zum Selbsttest, zur Eigendiagnose und zur Kommunikationsfähigkeit treten zunehmend in den Vordergrund.
- **Miniaturisierung:** Sie wird auf Grund technologischer Fortschritte weiter zunehmen. Positive Folgen sind geringerer Energieverbrauch, der Aufbau autarker Sensoren oder Sensorsysteme und neue Anwendungsgebiete der Sensorik wie in der Mikroreaktionstechnik oder in miniaturisierten medizinischen und technischen Systemen.
- **Intelligenz:** Sie wird ein wichtiges Kriterium für den Markterfolg künftiger Sensoren sein. Die Sensorelektronik wird verstärkt mit applikationsspezifischem Know-how ausgestattet sein. Sensoren werden sich selbst kalibrieren und diagnostizieren. Mehrere Systemparameter werden erfasst. Die Parallelverarbeitung der Daten lässt hochdynamische Anwendungen zu. Selbstüberwachende Systeme mit Selbstredundanz sind möglich.
- **Integration:** Die Signalverarbeitung ist heute schon weitgehend in der Sensorelektronik integriert. Zukünftig wird zunehmend die Schnittstelle zum Bussystem in die Sensorelektronik integriert. Der Komplex Sensor-Aktor wird in einem System vereint. Die Mikrosystemtechnik spielt hierbei eine wichtige Rolle.
- **Standardisierung:** Die Schnittstellen der Sensoren werden zunehmend standardisiert. Einheitliche Bus-Standards ermöglichen offene Systeme und reduzieren den Systemintegrationsaufwand. Telewartung via Internet wird zum Standard gehören.
- **Kosten:** Der Einsatz von Mikrotechniken hat insbesondere bei Sensoren mit hohen Stückzahlen zu einem Preisverfall geführt. Trotz besserer Systemeigenschaften und Integration zusätzlicher Aufgaben in den Sensor werden deshalb Entwicklungen in der Sensorik primär zu Kostensenkungen der gesamten Systemkette führen.

Aus Sicht des Forschers ergeben sich selbstverständlich viele Übereinstimmungen. Zusätzlich sind folgende Aspekte interessant:

- **Neue Materialien:** Das Beispiel der GMR-Sensoren zeigte, wie eine Materialentwicklung mit völlig anderer Zielstellung zu einem interessan-

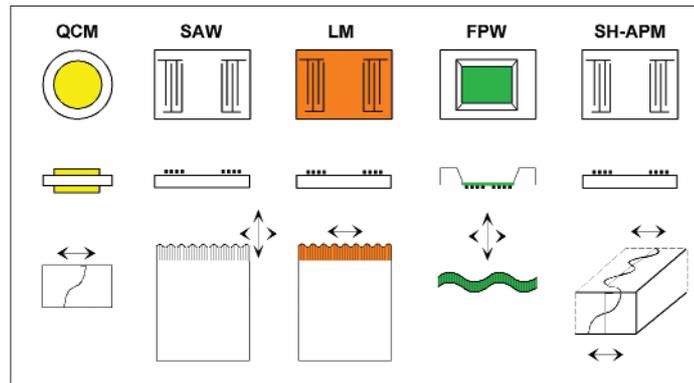


Abbildung 12  
Prinzipien verschiedener akustischer Mikrosensoren

ten Sensor führen kann. Deshalb sind Materialien wie GaN, SiC und deren Modifizierungen, leitfähige Polymere, neue Keramiken, modifizierte oxidische Halbleiter und andere für den Sensorentwickler sehr wichtig. Ein noch nicht abschätzbare Feld ist die Nutzung der DNS-Eigenschaften. Es gibt erste konkrete Versuche, elektronische Bauelemente auf dieser Basis aufzubauen. Für neue Sensoren ist dieses Feld hochinteressant.

- **Neue Technologien:** Die Nutzung der Mikrotechniken hat zu vielen neuen Sensoren mit besseren Eigenschaften als zuvor geführt. Es ist anzunehmen, dass die Nanotechnologie diese Entwicklung ebenfalls positiv beeinflusst. Man spricht heute schon vom so genannten NEMS, dem „nanoelectromechanical system“. Der Sensor auf molekularer oder atomarer Ebene spielt in diesem Kontext eine wichtige Rolle.
- **Neue Sensorprinzipien:** Nicht nur im „Kleinen“ ist Forschungsarbeit vonnöten. Es gibt erstaunlicherweise auch im „Großen“ noch weiße Felder. Als Beispiele seien genannt: dynamische Viskositätssensoren, Dichtesensoren als Ergänzung oder Erweiterung von Coriolis-Sensoren, Sensoren zur Teilchengrößenbestimmung, Sensoren zur Zustandserfassung in mehrkomponentigen Systemen. Auch Biosensoren in Form von Immuno- oder Rezeptorsensoren stellen hohe Anforderungen an den Entwickler.



Abbildung 13  
QCM-Sensorsysteme

Zusammenfassend sei festgestellt, dass die Sensorik ein äußerst breit gefächertes Gebiet ist, das interdisziplinäres Arbeiten von Naturwissenschaftler und Ingenieur unabdingbar macht. Es wird auch in der Zukunft eine spannende und innovative Disziplin bleiben.

## Literatur

- /1/ P. Hauptmann, Sensoren-Prinzipien und Anwendungen, Hanser-Verlag, München 1992
- /2/ R.H. Grace, P. Salomon, Microsystems/MEMS/Micromachines – on the move from technology to business, mst news 5/01, 4-8
- /3/ O. Grassmann, H. Meixner, Sensors in intelligent Buildings, Wiley-VCH, Weinheim 2001
- /4/ M.N. Baibach, J.M. Broto, Giant magnetoresistance in (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices, Phys.Rev.Lett. 61 (1988), 2472-2476
- /5/ U. Rüdiger, C. Kleve, GMR-Sensoren – die neue Art, Magnetfelder zu messen, elektronik-industrie 8/98
- /6/ H. Fritsch, R. Lucklum, T. Iwert, P. Hauptmann, D. Scholz, E. Peiner, A. Schlachetzki, A low-frequency micromechanical resonant vibration sensor for wear monitoring, Sensors and Actuators A 62 (1997), 616-620
- /7/ F.W. Behnecke, Das Ohr am Prozeß, Chemie Technik 4 (1996), 42-45
- /8/ A. Püttmer, Ultrasonic Density Sensor for Liquids, PhD thesis Magdeburg 1998, Shaker-Verlag Aachen 1999
- /9/ M. Rapp, A. Voigt, V. Hartmann, Elektronische Nasen für industrielle Hochleistungsanwendungen, Nachrichten FZK 34, 2-3 (2002), 112-118
- /10/ C. Behling, R. Lucklum, P. Hauptmann, The non-gravimetric quartz crystal resonator response and its application for polymer shear moduli determination, Meas. Sc. Technol. 9 (1998), 1886-1893
- /11/ R. Lucklum, P. Hauptmann, Transduction mechanism of acoustic-wave based chemical and biochemical sensors, Meas. Sci. Techn., (2003), in print



### Prof. Dr. Peter Hauptmann,

Jahrgang 1944, studierte an der Technischen Universität Dresden Physik. Nach Promotion und Habilitation auf dem Gebiet der Experimentalphysik an der Technischen Hochschule Leuna-Merseburg wurde er 1985 als Professor für Prozessmesstechnik an die damalige Technische Hochschule

Magdeburg berufen. Von 1977 bis 1978 arbeitet er an der Staatlichen Leningrader Universität im Bereich Molekularphysik. Seit 1993 ist er ordentlicher Professor für Messtechnik/Sensorik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Er ist Autor bzw. Mitautor von sechs Büchern, darunter der 1992 ins Englische übersetzten Monografie „Sensoren-Prinzipien und Anwendungen“, 285 Publikationen und 15 Patenten. Seine Arbeitsgruppe erhielt 1996 den Forschungspreis der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Er ist derzeit Editor-in-Chief des Journals „Measurement Science and Technology“.

Forschungsschwerpunkte liegen auf den Gebieten physikalische und chemisch/biologische Sensoren, insbesondere Ultraschallsensoren, resonante Sensoren, Sensoren zur Fluidanalytik; Sensorinterfacedelektronik, Systementwicklung, Mikrosensoren und Sensoranwendungen.



### Dr. Ralf Lucklum,

Jahrgang 1953, studierte und promovierte an der Hochschule Leuna-Merseburg im Fachgebiet Physik. Seit 1986 arbeitet er an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, und habilitierte auf dem Gebiet Messtechnik/Sensorik. 1992-93 arbeitete er an der University of Wisconsin – Madison, Department of Electrical and Computer Engineering. Ihn verbinden enge wissenschaftliche Kontakte mit den Sandia National Laboratories, Albuquerque, sowie universitären Einrichtungen in den USA, Europa und Lateinamerika. Er ist Autor

bzw. Mitautor von 100 Publikationen und 6 Patenten sowie Referee von mehreren internationalen Journalen. Forschungsschwerpunkte liegen auf den Gebieten der chemischen und biologische Sensoren, insbesondere der Modellierung und Anwendung resonanter Sensoren, der Sensoren zur Untersuchung dünner Schichten und Grenzflächen und der Sensorsystementwicklung.