

# Sensoren für die Prozessautomatisierung

Druckmessumformer sind essenziell für die Prozessindustrie. Mit Simulationen von physikalischen Effekten lassen sie sich optimieren.

Jürgen Spitzer, Ralf Huck und Philippe Labalette

In industriellen Anlagen sind eine Vielzahl von Sensoren nötig, um Größen wie Druck, Füllstand oder Temperatur zu messen. Die Simulation der zugrunde liegenden unterschiedlichen physikalischen Effekte erlaubt es, die Leistung der Sensorik wesentlich zu steigern. So gelang es beispielsweise, bei Druckmessumformern der neuen Generation die Langzeitstabilität um das Fünffache zu steigern und Linearität sowie Temperaturempfindlichkeit enorm zu optimieren.

Überall dort, wo es um die kontinuierliche Verarbeitung von Materialien in chemischen, physikalischen oder generell technischen Prozessen geht, spricht man von Prozessindustrie. Dazu zählen Unternehmen der Chemie- und Pharmabranche ebenso wie Produzenten von Nahrungsmitteln, Papier oder Zement. Um die zur Herstellung der Güter nötigen Rezepte oder Ablauffolgen reproduzierbar, kostenoptimal und sicher durchführen zu können, ist Automatisierung essenziell. Die Basis dafür bilden Feldgeräte. Zu diesem Oberbegriff zählen Messumformer – das sind Sensoren plus zugehöriger Elektronik – sowie Aktoren wie Stellglieder oder Ventile. Feldgeräte erfassen physikalische Größen, sie überwachen und steuern die zahlreichen Prozesse in den unterschiedlichsten Industrieanwendungen. Sie sind prozessnah installiert und übermitteln ihre Informationen an die übergeordnete Leittechnik. In einer typischen Anlage der Prozessindustrie sind einige hundert bis tausend Feldgeräte im Einsatz und bilden somit unter dem Investitionsaspekt einen bedeutenden Wert. Innovationen bei Feldgeräten haben daher auch einen großen Einfluss auf den gesamten Wertschöpfungsprozess und wirken sich in allen Lebenszyklen einer Anlage positiv aus.

Obwohl Messumformer eine Vielzahl von unterschiedlichen physikalischen Messprinzipien nutzen, ist ihr prinzipieller Aufbau immer gleich: Auf der Prozessseite nimmt das Sensor-Subsystem die physikalische Größe wie Druck, Temperatur oder Kraft auf und wandelt diese in ein elektrisches Signal um (Abb. 1). Ein Transmitter verarbeitet das Signal und gibt es zum einen an die übergeordnete Leitebene weiter, zum anderen an sein eigenes Human Machine Interface (HMI). Das HMI beinhaltet lokale Anzeige- und Bedienelemente des Messumformers, die für Vor-Ort-Bedienung und schnelle Anpassung an die Applikation sowie für die Analyse beim Auftreten von Fehlern nötig sind.



Die Zahl der physikalischen Messgrößen ist sehr umfangreich, und für jede gibt es mehrere Messmethoden. So lassen sich Durchfluss oder Füllstand mit Ultraschall erfassen, letzterer auch mit Hochfrequenzstrahlung, während sich die Piezoelektrizität eignet, um Druck und Widerstand zu bestimmen, oder die Thermospannung für die Temperatur. So lässt sich der Füllstand in einem Silo mithilfe von Ultraschall- oder Radarmessumformern bestimmen oder aber durch Wiegen des kompletten Silos.

Die Anforderungen an Messumformer sind sehr hoch, da typische Umgebungstemperaturen zwischen  $-40\text{ °C}$  und weit über  $100\text{ °C}$  liegen und im Prozess

In Raffinerien sowie vielen anderen Industrieanlagen nehmen Druckmessgeräte eine besondere Rolle ein.

## KOMPAKT

- Bei allen Messumformern (Sensoren plus Elektronik) nimmt ein Sensor-Subsystem eine physikalische Größe wie Druck, Temperatur oder Kraft auf und wandelt diese in ein elektrisches Signal um.
- Drucksensoren verfügen über eine Membran, deren Verformung kapazitativ, induktiv, piezoresistiv, über den Hall-Effekt oder mit Resonatoren registriert wird. Zur Vermeidung von Schäden durch aggressive Prozessmedien ist der Primärsensor zu schützen und zudem mit einem Überlastschutz zu versehen.
- Mit ausführlichen Simulationen lässt sich das komplexe Gesamtsystem in Bezug auf die Linearität innerhalb des gewünschten Messbereichs optimieren und die Langzeitstabilität verbessern.

Dr. Jürgen Spitzer, Dr. Ralf Huck und Philippe Labalette, Siemens AG, Rheinbrückenstraße 50, 76187 Karlsruhe

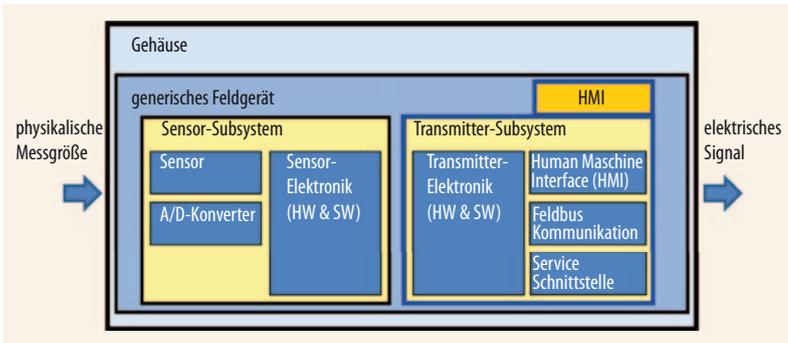


Abb. 1 Ein Messumformer wandelt physikalische Messgrößen in elektrische Signale um. Hauptkomponenten des

Messumformers sind das Sensorsystem und der Transmitter, die gemeinsam das „mechatronische System“ bilden.

aggressive Medien oder explosionsgefährdete Bereiche ebenso auftreten können wie besondere Ansprüche hinsichtlich der Hygiene. Als ein Beispiel betrachten wir das heute weltweit gängigste Produktionsverfahren für Zement, die Trockenzementherstellung (Abb. 2). Dabei sind die Anforderungen an Messumformer extrem: Im ersten Schritt der Zerkleinerung des Rohmaterials treten unter anderem starke mechanische Belastungen und Staubbildung auf, denen die Feldgeräte dauerhaft widerstehen müssen.

Das Homogenisierungssilo in der Mineralaufbereitung stellt als weiteres Beispiel sehr hohe Anforderungen an die auf Radar basierende Füllstandmessung. Diese über 40 Meter hohen Silos werden ständig befüllt, entleert und dabei kontinuierlich belüftet, damit sich die Komponenten optimal durchmischen. Die enorme Staubbildung erschwert es, den Füllstand

auf wenige Millimeter genau zu messen. Die Messung von Drücken an den unterschiedlichsten Stellen der Anlage spielt vor allem beim Kernprozess der Herstellung von Zementklinker eine maßgebliche Rolle. Um die steigenden Anforderungen an Druckmessumformer erfüllen zu können, ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Geräte erforderlich.

### Vielseitige Herausforderung: Drucksensoren

Um eine Anlage ressourcenschonend steuern und dabei umweltschonende Prozessabläufe sicherstellen zu können, ist es unerlässlich, die Prozesswerte genau zu kennen. Druck ist hierbei eine sehr häufig zu messende Größe, da sich daraus direkt weitere, wichtige Prozessgrößen bestimmen lassen. So ergibt sich z. B. der Füllstand von Flüssigkeiten in offenen Tanks aus dem durch die Flüssigkeitssäule erzeugten hydrostatischen Relativdruck. In geschlossenen Tanks kann der Druck durch das oberhalb der Flüssigkeit eingeschlossene Gasvolumen höher oder niedriger sein als der Umgebungsdruck. Dann eignen sich Differenzdrucksensoren zur Füllstandmessung, da sie den hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule durch Differenzbildung und damit unabhängig vom Behälterinnendruck bestimmen. Ein weiteres, bewährtes Messverfahren ist die Durchflussmessung nach dem Wirkdruckprinzip. Ein Drosselgerät schnürt dabei den Leitungsdurchmesser ein und erhöht somit die Durchflussgeschwindigkeit. Nach Bernoulli nimmt dadurch der statische Druck ab. Der durch die Drossel hervorgerufene Wirkdruck (Druckdifferenz)

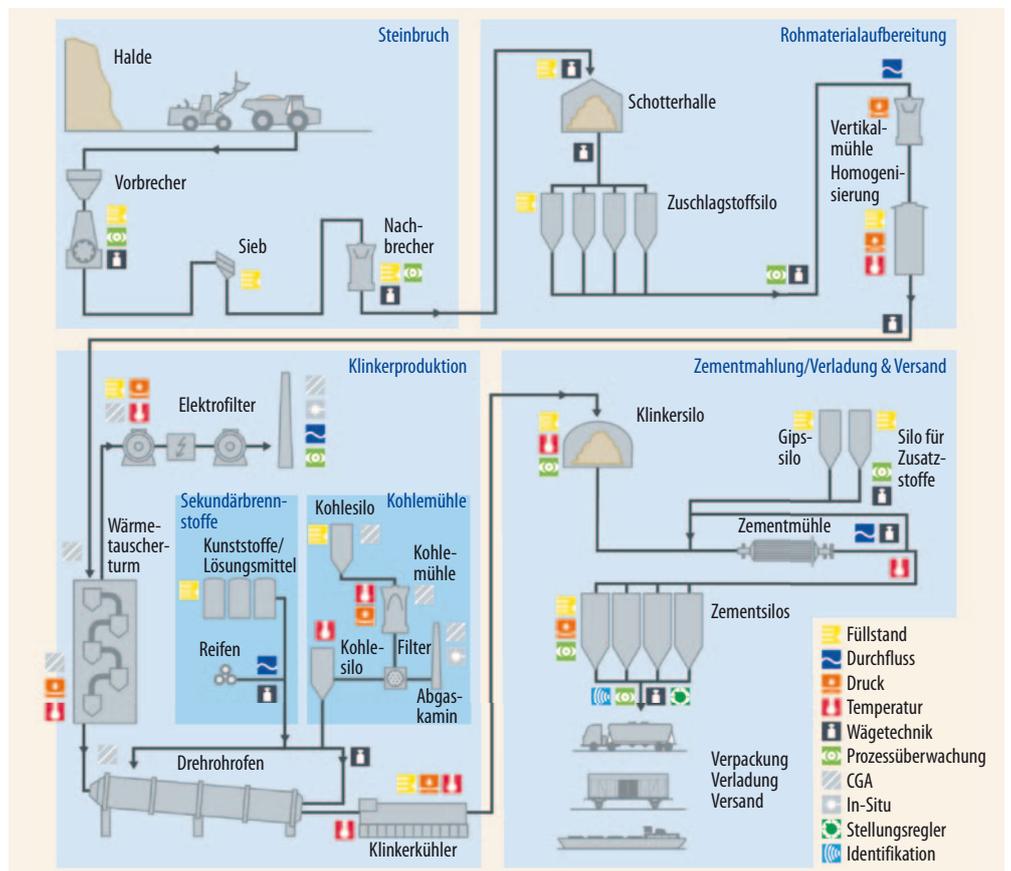


Abb. 2 Die Herstellung von Zement ist ein komplexer Prozess aus vielen Schritten, bei denen jeweils verschiedene Feldgeräte zur Messung von Füllständen, Durchflüssen oder Drücken zum Einsatz kommen.

eignet sich also dazu, den Durchfluss präzise zu bestimmen, und zwar von Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen, auch bei großen Durchmessern, hohen Temperaturen und extremen Drücken. Die Normung der benötigten Drosselgeräte und die exakten Berechnungsvorschriften sind nach DIN EN ISO 5167 festgelegt. Drucksensoren sind also vielfältig einsetzbare Messgeräte für die Prozessgrößen Druck, Füllstand und Durchfluss (Infokasten „Passgenaue Drucksensorik“).

Die Herausforderungen an die Druckmesstechnik lassen sich aus der Vielzahl der möglichen Anwendungen, der Geometrie der Messstelle und der geforderten Umgebungs- und Medienresistenz ableiten. In der Prozessindustrie hat die Druckmessung einen unmittelbaren Einfluss auf Ausbeute und Produktqualität. Da hier im Vergleich zur diskreten Fertigung (z. B. im Automobilbau) nicht der Fertigungsablauf, sondern die Herstellparameter des Produkts selbst auf dem Prüfstand stehen, benötigen die Geräte häufig eine zehnfach höhere Genauigkeit und Langzeitstabilität. Für einen modernen Druckmessumformer bedeutet dies eine typische Messgenauigkeit von  $\pm 0,05$  Prozent. Ferner erfordert die Prozessindustrie eine höhere Robustheit und Flexibilität. Beliebige flüssige oder gasförmige Medien in unterschiedlichster Konsistenz und Aggressivität gilt es bei Drücken von wenigen Millibar bis weit über 1000 Bar präzise zu messen. Wie lässt sich hier das Optimum für den Anwender erreichen, wenn die Kosten der Messtechnik über ihren gesamten Lebenszyklus eine immer wichtigere Rolle spielen?

Besondere Beachtung ist hierbei zunächst dem Primärsensor zu schenken. Bis heute haben sich am Markt eine Vielzahl von unterschiedlichen Sensorprinzipien etabliert: Allen gemeinsam ist eine Membrane, deren druckinduzierte Auslenkung (Verspannung) sich mit unterschiedlichen Prinzipien erfassen lässt, etwa kapazitiv, induktiv, piezoresistiv, durch den Hall-Effekt oder mit Resonatoren. Entscheidend für die Auswahl des Prinzips ist in erster Linie seine Empfindlichkeit, Reproduzierbarkeit, Hysteresefreiheit und vor allem die erreichbare Langzeitstabilität.

Auf Silizium und Mikromechanik basierende Primärsensoren eignen sich besonders, um den Druck in eine elektrische Größe zu wandeln. Dabei werden Fläche und Dicke einer dünn geätzten Silizium-Membran dem gewünschten Messbereich angepasst (Abb. 3). Verspannt sich die Membran infolge des angelegten Drucks, dehnt sie sich in der Nähe der Einspannung aus, während sie im Membranzentrum gestaucht wird. Hier sind jeweils zwei piezoelektrische Widerstände durch Dotierung des Siliziums implantiert und zu einer Wheatstoneschen Brücke verschaltet. Diese sorgt für die Verstärkung der durch Verspannung induzierten gegenläufigen Widerstandsänderungen. Dagegen kompensieren sich die temperaturabhängigen, gleichläufigen Widerstandsänderungen weitgehend. Der Temperatursensor bestimmt die Temperatur, mit der die Elektronik den verbleibenden Temperaturfehler gemäß einer im Fertigungsprozess ermittelten Kennlinie rechnerisch kompensiert.

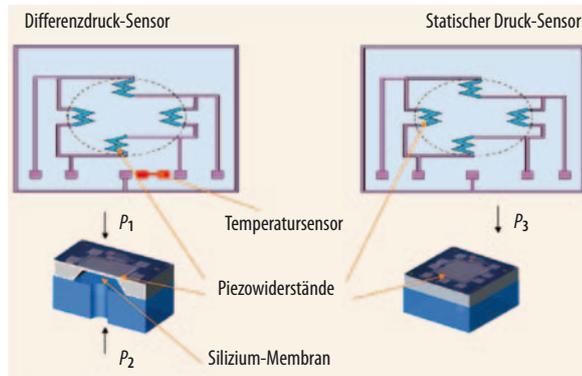


Abb. 3 Bei dem in Piezo-Mikromechanik hergestellten Primärsensor für die Messung der Drücke  $P_1$ – $P_2$  bzw.  $P_3$  erkennt man im Schnitt die dünn geätzte Membran, die durch geeignete Bondprozesse mit dem starren Trägerkörper verbunden ist. Die vier Widerstände der Wheatstoneschen Brücke werden auf der Membran in Bereichen größtmöglicher Dehnung bzw. Stauchung implantiert. Der Temperatursensor dient zur Kompensation der verbleibenden Temperaturabhängigkeit.

### Das geeignete Sensorprinzip wählen

Das Prinzip eines in Piezo-Mikromechanik hergestellten Primärsensors ist seit Jahrzehnten bekannt. Die Marktposition eines Technologieführers lässt sich aber nur durch eigene konsequente Weiterentwicklung dieser Technik erreichen. Dies setzt ein fundiertes Verständnis der Physik voraus, um beispielsweise Ätz- und Bondprozesse, die Symmetrie des mechanischen und elektrischen Aufbaus oder die pn-Übergänge der Piezowiderstände zu verändern. Die Vielzahl der zu betrachtenden Parameter lässt sich nur durch simulationsgestützte Verfahren optimieren. In der Zusammenarbeit zwischen Siemens und seinen Technologiepartnern ist in Summe ein System entstanden, das entscheidende Vorteile bietet.

Bei der Auswahl des geeigneten Sensorprinzips kommt es aber nicht nur auf den Primärsensor an. Die Auslegung des gesamten mechatronischen Systems, also das Zusammenspiel der Primärsensorik mit der benötigten Aufbau- und Verbindungstechnik und der Auswertelektronik, nimmt eine ebenso wichtige Rolle bei der Verbesserung von Genauigkeit und Stabilität ein. Die Medienbeständigkeit der meisten Primärsensoren reicht nämlich nicht aus, um sie dem Prozess ungeschützt auszusetzen. Zum Schutz vor aggressiven Prozessmedien ist der Primärsensor daher in der Messzelle eines Relativ- oder Absolutdrucksensors einseitig mit Öl geschützt, während die Rückseite der Membran mit der Umgebung in Verbindung steht bzw. über ein abgetrenntes Volumen ein Vakuum bereitstellt. In der Differenzdruckzelle kann der Prozessdruck von beiden Seiten auf die Membran wirken. Demzufolge ist die Membran beidseitig mit Öl zu schützen. Ferner lässt sich eine mögliche Beschädigung des Primärsensors bei prozessbedingten oder ungewollten Überdrücken zuverlässig verhindern. Diese Rolle übernimmt beim Differenzdrucksensor das hydraulische Überlastsystem, das wir am Beispiel des prinzipiellen Aufbaus einer Differenzdruckmesszelle näher beschreiben (Abb. 4).

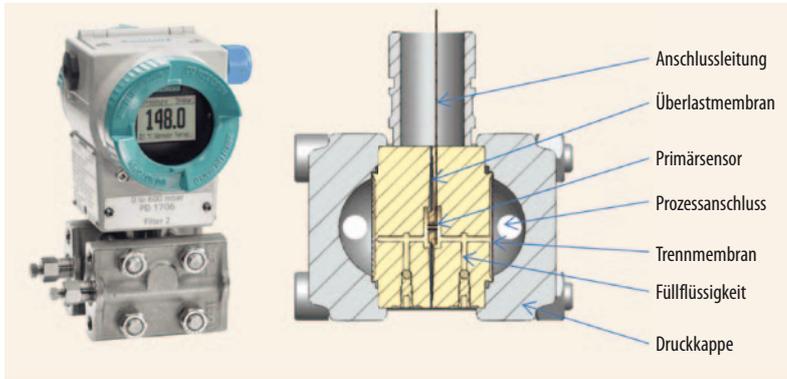


Abb. 4 Im Druckmessumformer P500 (links) werden Differenzdruckmesszellen eingesetzt. Die Schnittzeichnung (rechts) zeigt die beiden Prozessanschlüsse (Druckkappen), die den Prozessdruck auf

die Trennmembran übertragen. Die Füllflüssigkeit des Hydrauliksystems schützt den in der Überlastmembran federnd gelagerten Primärsensor vor Beschädigung.

### Präzises Gesamtsystem

Aufgabe des Hydrauliksystems ist es, die Prozessdrücke auf beiden Seiten der Messzelle auf den Primärsensor zu übertragen und ihn gleichzeitig über die beiden Trennmembranen hermetisch vom Prozessmedium zu trennen. Diesen beiden nur wenige Mikrometer starken Membranen kommt hierbei eine entscheidende Aufgabe zu. Einerseits sind sie der schwächste, medienberührende Teil des Messumformers. Die Materialien sind daher in geeigneter Weise zu wählen, um den unterschiedlichsten Prozessbedingungen standzuhalten: Nichtrostender Stahl eignet sich für alle Standardanwendungen einschließlich niedrig konzentrierter, oxidierender Säuren. Für nicht oxidierende Säuren, Laugen oder Meerwasseranwendungen kommen dagegen je nach Einsatzbedingungen die Legierungen HasteloyC oder Monel infrage. Tantal lässt sich beispielsweise in Salzsäure-Umgebungen einsetzen. Andererseits bildet die Membran ein möglichst weich auszulegendes Federsystem, dessen temperatur- und alterungsabhängigen Rückstellkräfte die Linearität und letztendlich die Langzeitstabilität des Messumformers negativ beeinflussen. Die Steifigkeit

einer starr eingespannten, planaren Membrane wird in erster Linie durch ihrer Dicke und die Elastizität ihres Materials bestimmt. Damit die Rückstellkräfte der Trennmembrane das Messsignal nicht negativ beeinflussen, muss diese also möglichst dünn ausgelegt sein. Die Trennmembran ölgefüllter Drucksensoren ist darüber hinaus häufig wellenförmig ausgeführt, um eine weitere Reduzierung ihrer Rückstellkräfte zu erreichen.

Ein weiterer funktionsbestimmender Teil der Messzelle ist die Überlastmembran, welche die beiden Ölvolumina auf beiden Seiten der Membrane voneinander trennt. Ihre Federkennlinie ist an den Messbereich des Primärsensors angepasst. Dieser ist in die Überlastmembran integriert, so ist auch seine eigene, druckempfindliche Membran beidseitig von den beiden Ölvolumina umschlossen. Das System ist derart ausgelegt, dass bei Überschreitung des Primärsensor-Messbereichs das gesamte Ölvolumen unter der Trennmembran verdrängt ist, die Trennmembran sich also in ihr Membranbett legt. Somit ist ein weiterer Druckanstieg in Öl ausgeschlossen und der Primärsensor vor Überlast geschützt. Das Überlastsystem eines etwa auf 250 mBar ausgelegten Messbereichs hält damit Prozessdrücken von mehr als 400 Bar stand, ohne dass der druckempfindliche Primärsensor Schaden nimmt. Während der piezoresistive Primärsensor kaum anfällig gegenüber dynamischer Alterung ist, muss jedoch das Überlastsystem selbst geeignet ausgelegt sein, um den Druckzyklen über die Lebensdauer einer prozesstechnischen Anlage standzuhalten. Ohne Simulation der mechanischen Einspannparameter wären derartige Systeme nicht wirtschaftlich auszulegen. Andererseits lässt sich aber nicht vollständig auf die Absicherung durch empirische Daten verzichten, da auch Schweiß-, Umform- und thermische Verfahren sowie die Oberflächenbeschaffenheit die Robustheit des Systems signifikant beeinflussen können.

Um eine Vorstellung über die erforderliche Präzision, Sauberkeit und Reproduzierbarkeit zu geben, betrachten wir einige Kenngrößen des Überlastsystems näher. Die Auslenkung der Membrane eines auf 250 mbar ausgelegten Primärsensors beträgt nur wenige Mikrometer bei einer Fläche von etwa 10 mm<sup>2</sup>. Daraus ergibt sich bei einer Untersetzung des Messbereichs von 1:100 und einer angestrebten Auflösung von 0,05 Prozent des unteretzten Messbereichs eine Verschiebung des Ölvolumens von nur etwa einem Picoliter. Geringste Verunreinigungen im verwendeten Öl, unbeherrschte Schweißprozesse oder Diffusionseffekte an der Aufbau- und Verbindungstechnik machen daher eine hochgenaue Messung unmöglich. Dies gilt umso mehr, wenn extreme Bedingungen vorliegen, wie hohe Prozesstemperaturen und niedrige Prozessdrücke in der Nähe des Dampfdrucks des verwendeten Hydrauliköls. Erst im Zusammenspiel zwischen einem hochstabilen Primärsensor und einer hierzu kompatiblen Aufbau-, Verbindungs- und Verpackungstechnik kann also ein für die Prozessindustrie geeignetes System entstehen, das den Ansprüchen genügt.

### PASSGENAUE DRUCKSENSORIK

Drucksensoren messen einen aktuellen Druck im Vergleich zu einem Referenzwert und lassen sich in folgende Varianten unterteilen:

- **Relativdrucksensoren** messen im Vergleich zum Umgebungsdruck und besitzen nur einen Anschluss. Der Umgebungsdruck gelangt durch ein Belüftungsloch oder -schlauch zur Rückseite der Sensormembran. Wichtige Anwendungen sind die Überdruckmessung in geschlossenen Behältern, Pumpen oder Rohrleitungen, z. B. Pipelines, sowie hydrostatische Füllstandmessungen in offenen Behältern.
- **Absolutdrucksensoren** messen den Druck im Vergleich zu einem im

Sensorelement eingeschlossenen Vakuum mit verschwindendem Druck. Sie sind notwendig, um kleine Drücke in geschlossenen Systemen zu messen, da ein Relativdrucksensor durch den schwankenden Umgebungsdruck große Messfehler aufweist.

- **Differenzdrucksensoren** messen den Unterschied zwischen zwei beliebigen Drücken und besitzen daher zwei separate Zuleitungen, z. B. Gewindeanschlüsse. Sie werden eingesetzt für die hydrostatische Füllstandmessung in geschlossenen Behältern, zur Filterüberwachung oder zu der auf dem Wirkdruckverfahren basierenden Durchflussmessung.

## Bessere Langzeitstabilität und optimierte Linearität

Anhand von zwei Beispielen wollen wir nun zeigen, wie es die Simulation von physikalischen Effekten ermöglicht, die Leistung von Druckmessumformern der neuen Generation wesentlich zu steigern.

### Optimierung der Langzeitstabilität

Eine wesentliche Rolle für die Genauigkeit des Messsignals spielt der piezoresistive Primärsensor. Dieser wird mit seinem Trägerkörper zur Fixierung in der Druckmesszelle auf einen Sockel geklebt. Da die verklebten Materialien verschiedene Ausdehnungskoeffizienten aufweisen, entsteht eine mechanische Spannung, die sich bis zum Piezowiderstand auf der Membran (Abb. 3) ausbreiten und das Messsignal beeinflussen kann. Die Kleberalterung über die Zeit beeinträchtigt dadurch die Langzeitstabilität, was die konventionelle Piezosensorik bisher vor eine unüberwindbare Grenze gestellt hat. Die Möglichkeiten, die Klebung selbst zu optimieren, waren ausgeschöpft. Erst durch simulationsunterstützte Optimierung der Geometrie sowie der Position der Widerstände ist es gelungen, den Einfluss der klebebedingten Spannung auf das Messsignal signifikant zu unterdrücken.

Für diese Optimierung sind drei aufeinander folgende Simulationsschritte notwendig: die der Implantation der mit Bor  $p^+$ -dotierten Widerstandsbereiche, der Stromdichte in den Widerständen und der mechanischen Spannungen im Bereich der Widerstände (Abb. 5).

Dabei dienen die Ergebnisse der Simulationen als Basis für den nächsten Berechnungsschritt: Nachdem die Empfindlichkeit der Widerstände auf die mechanische Spannung bestimmt ist, lässt sich dieses Resultat für ein neues Design der Implantation verwenden. Die Schritte werden iterativ durchgeführt, bis die gewünschte Spannungsempfindlichkeit erreicht ist. Diese Optimierungsmethode der Piezowiderstände

de bei der Entwicklung der neuen Chip-Generation ermöglicht heute eine fünffache Verbesserung der Langzeitstabilität. Während bekannte Systeme nur eine Stabilität von 0,25 Prozent auf fünf Jahre bieten, erreicht die neue Chip-Generation 0,05 Prozent im gleichen Zeitraum.

### Linearität und Temperaturempfindlichkeit

Die Steifigkeit der Trennmembranen hat einen wesentlichen Einfluss auf Nichtlinearität und Temperaturempfindlichkeit von Druckmessumformern. Zum einen dehnt sich bei Temperaturänderung die Füllflüssigkeit aus oder sie schrumpft. Dadurch ändert sich die Wölbung der Trennmembran und somit deren Steifigkeit. Zum anderen verschiebt sich bei Druckänderungen die Überlastmembran und dadurch auch die Trennmembran – auch dies führt zu einer ungewollten Änderung ihrer Steifigkeit.

Bei der Entwicklung der neuen Generation von Druckmessumformern kommen moderne CAE-Simulationsmethoden (Computer Aided Engineering) zum Einsatz, um die Kennlinie der Membransteifigkeit über Druck und Temperatur zu optimieren (Abb. 6).

Wie im letzten Abschnitt erläutert, hängt die Steifigkeit der Trennmembran von ihrer geometrischen Auslegung und insbesondere ihrem wellenförmigen Profil ab. Für eine präzise simulationstechnische Vorhersage ihrer mechanischen Eigenschaften ist aber auch ihr Fertigungsprozess zu betrachten. Da die flache Trennmembran geschweißt und danach wellenförmig auf die Druckmesszelle geprägt wird, kommt eine Multiprozesssimulation mit Hilfe der Simulationsumgebung NX CAE von Siemens<sup>+)</sup>  zum Einsatz:

- Zuerst sind die thermischen Effekte beim Schweißen der Trennmembran auf die Druckmesszelle zu simulieren.
- Die durch Temperatur verursachte mechanische Spannung wird im Material fest gespeichert, während die FEM-Netze<sup>\*)</sup>  von der Membran und von der

<sup>+)</sup>  R. Anderl, P. Binde, Simulationen mit NX, Hanser Fachbuch (2010)

<sup>\*)</sup>  FEM steht für Finite-Element-Methode.

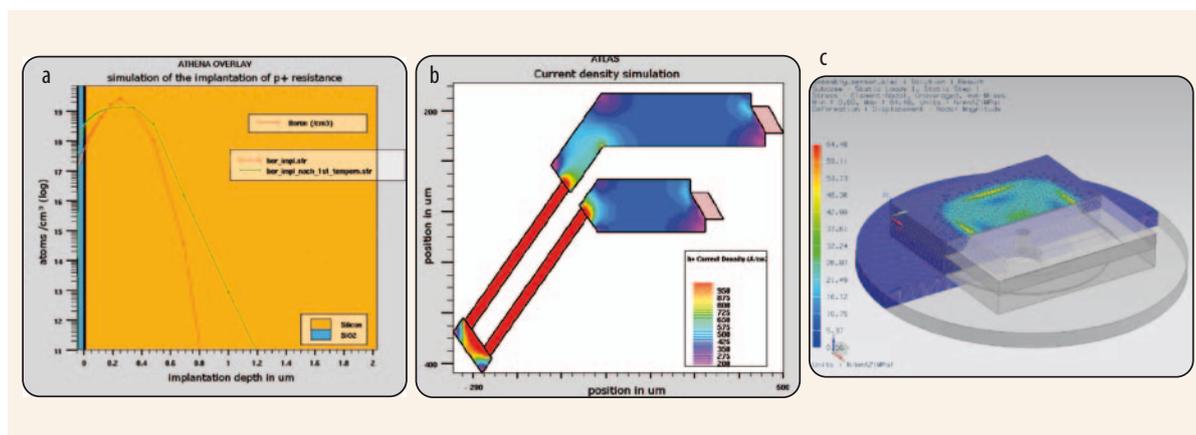
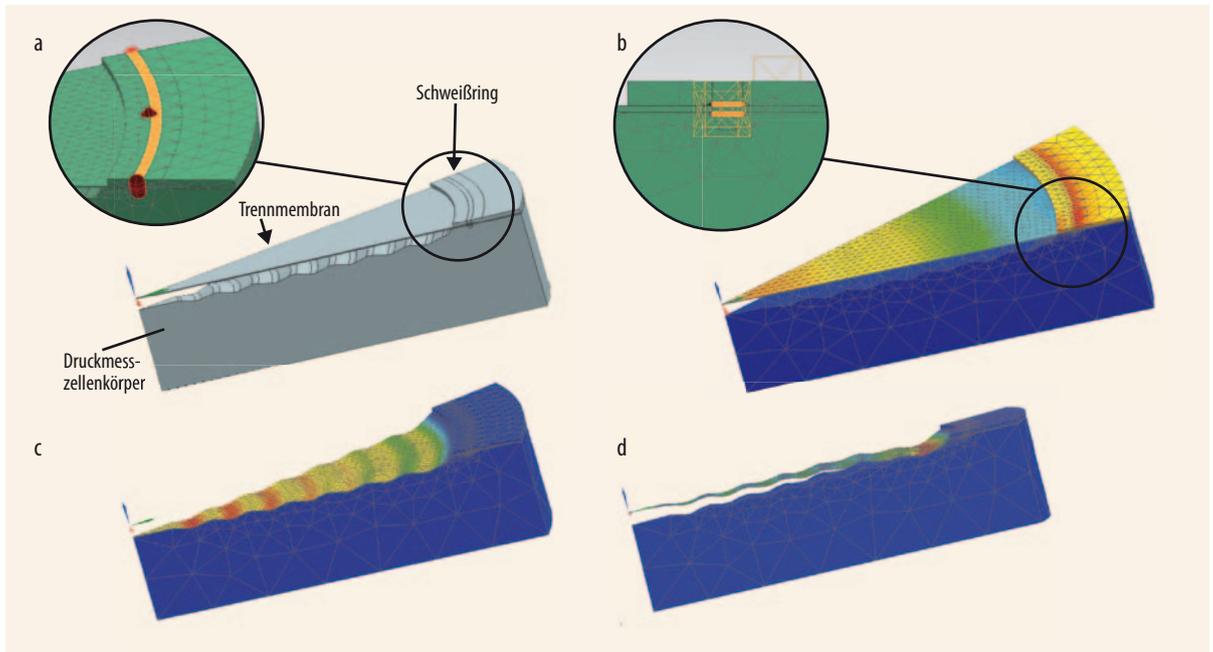


Abb. 5 Gekoppelte Simulationen erlauben es, die Piezo-Widerstände zu optimieren. Dazu wird zunächst die Dichte der für den  $p^+$ -Widerstand implantierten Bor-Atome mit der Software Athena MC Implant berechnet (a). Der Screenshot zeigt die Dichte vor (rot) bzw. nach (grün) einer Wärmebehandlung. Daraus lassen sich die räumliche Leitfähigkeit bzw. die elektrische Stromdichte mit ATLAS Device FW simulieren (b). Eine hohe

Stromdichte tritt im Widerstand auf (rot), eine geringere in den Zuleitungen (blau). Aus dieser Simulation lässt sich der tatsächliche Widerstandsbereich ermitteln sowie die Abhängigkeit von mechanischen Spannungen (c), die sich in dem auf einen Sockel (runde Platte) geklebten Chip (Quader) einstellen. Insgesamt erhält man somit die Änderungen der Leitfähigkeit aufgrund des piezoresistiven Effekts.



**Abb. 6** Die nichtlineare Multiprozesssimulation mittels Simulationsumgebung NX CAE von Siemens startet mit einem 3D-Modell von Trennmembran, Schweißring und Druckmesszellenkörper (a, grau). Nach dem Festlegen der Schweißparameter (Ausschnitt) lässt sich die thermische Ausdehnung beim

Schweißen (b) sowie die Auswirkung auf die Knotenverbindungen (Ausschnitt) beim Abkühlen simulieren. Die Analyse umfasst auch die nichtlineare Verformung der Membran, wenn diese auf den wellenförmigen Messzellenkörper geprägt wird (c) sowie die Membranfederkraft (d).

Druckmesszelle beim Schweißkühlprozess zusammengebunden werden.

■ Anschließend führt man mit Hilfe nichtlinearer mechanischer Simulation die Prägung der Trennmembran auf die Wellenformen der Druckzelle durch. Das führt zu einer plastischen Verformung der Membran. Diese Wellenformen ermöglichen eine starke Reduzierung der Steifigkeit.

■ Ab diesem Zeitpunkt lässt sich die Trennmembran unter Betriebsbedingungen untersuchen und die Trennmembranfederkraft beziehungsweise Steifigkeit bei unterschiedlichen Positionen ermitteln.

Diese Optimierung des Designs und des Fertigungsprozesses der Trennmembran ermöglicht eine bessere Linearisierung und Temperaturkompensation vom Gerät. Damit verbessert sich in der neuen Drucksensorgeneration die Linearität um den Faktor 2,5 – auf 0,03 Prozent – und die Temperaturempfindlichkeit um den Faktor 15 – auf 0,045 Prozent bei 28 °C.

### Ausblick

Das Beispiel der Druckmesstechnik hat gezeigt, wie sich physikalische Grundprinzipien in der Industrie anwenden lassen, um innovative Produkte zu entwickeln und zu optimieren. Wichtig dabei ist, neben dem entsprechenden physikalischen Grundverständnis auch die technisch-betriebswirtschaftliche Seite zu beachten, um tatsächlich die von den Anwendern benötigten Produkteigenschaften zu erzielen.

Die Anforderungen für künftige Entwicklungen von Feldgeräten umfassen eine weitere Verbesserung der Robustheit, Genauigkeit und Langzeitstabilität, die Erfassung von Zwischen- und Trendinformationen zu Produkteigenschaften für Regelzwecke, Informationen über die räumliche Verteilung von Prozessgrößen sowie Ermittlung und Lokalisierung von Grenzflächen bzw. -phasen. Die Lösung dieser Aufgaben ist auch künftig eine Herausforderung für Physiker in der Industrie.

### DIE AUTOREN

**Jürgen Spitzer** (FV Halbleiterphysik, Tiefe Temperaturen) leitet im Sektor Industrie der Siemens AG das Geschäftssegment Process Instrumentation.



Nach dem Studium der Physik in Ulm promovierte er an der U Stuttgart und am MPI für Festkörperforschung über Festkörperspektroskopie. Bevor er an anderer Stelle zu Siemens kam, arbeitete er für Texas Instruments und Infineon.

**Ralf Huck** leitet das Process-Instrumentation-Subsegment „Druck, Temperatur und Stellungsregler“. Er hat an der RWTH Aachen studiert und auf dem Gebiet der Gassensorik promoviert. In der Industrie entwickelte er zunächst Drucksensoren für die Prozessindustrie bei Degussa. Später übernahm er bei Hartmann & Braun sowie ABB unterschiedliche Funktionen in Entwicklung und Management.



**Philippe Labalette** ist Mitglied eines interdisziplinären Teams bei Siemens, das sich mit der Modellbildung und Simulation von physikalischen Vorgängen beschäftigt. Nach seinem Diplomabschluss am Institut Polytechnique in Frankreich hat er Elektrotechnik in Karlsruhe studiert. Seine erste Aufgabe in der Industrie war die Entwicklung von Durchflussmessgeräten bei Siemens VDO.

