

BT

DIE BIBLIOTHEK DER TECHNIK

323

Elektronische Druckmesstechnik

Grundlagen, Anwendungen und Geräteauswahl



VERLAG
MODERNE
INDUSTRIE

WIKA

Elektronische Druckmesstechnik323



Die Bibliothek der Technik
Band 323

Elektronische Druckmesstechnik

Grundlagen, Anwendungen
und Geräteauswahl

Eugen Gaßmann, Anna Gries



verlag moderne industrie

Dieses Buch wurde mit fachlicher Unterstützung der
WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG erarbeitet.

Der besondere Dank der Autoren für die sorgfältige Prüfung
des Buchinhalts gilt Herrn Dr. Franz-Josef Lohmeier.

© 2009 Alle Rechte bei
Süddeutscher Verlag onpact GmbH, 81677 München
www.sv-onpact.de
Abbildungen: Nr. 19 Phoenix Testlab GmbH, Blomberg;
Nr. 22 M+W Zander, Stuttgart; alle übrigen
WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, Klingenberg
Satz: abavo GmbH, 86807 Buchloe
Druck und Bindung: Sellier Druck GmbH, 85354 Freising
Printed in Germany 889095
ISBN 978-3-937889-95-5

Inhalt

Einleitung	4
Druck und Druckmessung	6
Internationale Druckeinheiten.....	6
Absolut-, Relativ- und Differenzdruck	7
Prinzipien der elektronischen Druckmessung.....	8
Sensortechnik	14
Metall-Dünnfilm-Sensor	14
Keramik-Dickschicht-Sensor	15
Piezoresistiver Sensor	17
Sensorprinzipien im Vergleich	19
Druckmessgeräte	21
Gerätebauarten im Überblick.....	21
Gerätequalifikation und -zuverlässigkeit	26
Umwelteinflüsse und besondere Anforderungen	32
Typische Anwendungen und Anforderungen	39
Grenzwertüberwachung	39
Druckregelung.....	41
Indirekte Messung von Prozessgrößen	42
Kriterien für die Geräteauswahl	49
Messbereich	49
Druckanschluss	52
Elektrischer Anschluss	54
Ausgangssignale	55
Kennlinie, Genauigkeit und Messfehler	58
Ausblick	68
Glossar	69
Der Partner dieses Buches	71

Einleitung

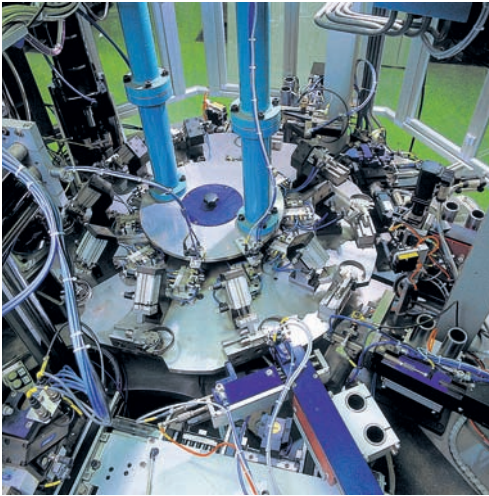
Elektronische Druckmesstechnik trägt zur sicheren Führung und präzisen und energiesparenden Steuerung und Regelung von Prozessen bei. Neben der Temperaturmesstechnik ist sie die wichtigste und am häufigsten eingesetzte Technik zur Überwachung und Steuerung von Maschinen und Anlagen. Vor allem in der Pneumatik und Hydraulik (Abb. 1) ist die Messung und Regelung des Systemdrucks die wichtigste Voraussetzung für einen sicheren und wirtschaftlichen Betrieb.

Vielfalt der Anwendungen und Geräte

In den vergangenen 20 Jahren hat die elektronische Druckmesstechnik in sehr vielen Anwendungen Einzug gehalten und jeden Tag kommen neue Anwendungen hinzu. So vielfältig wie die Anwendungen sind aber auch die Anforderungen an die Geräte. Diese Tatsache spiegelt sich auch in einer fast unüberschaubaren Anzahl von Produkten wider. Konnte ein Anwender in den Anfängen der elektronischen Druckmesstechnik lediglich aus einer geringen Anzahl von Modellen einer Handvoll Anbieter auswählen, sieht er sich heute mit einer Vielzahl von technischen Lösungen zahlreicher Anbieter konfrontiert und ist deshalb auf kompetente Hilfe bei der Auswahl angewiesen.

Geräteauswahl

Die notwendige Auswahl ist ein klassischer Optimierungsprozess, in dem zahlreiche Parameter verglichen und Anforderungen gegeneinander abgewogen werden müssen, um unterschiedliche Anwendungsziele zu erreichen, maximale Betriebssicherheit zu gewährleisten, die projektierte Leistung von Maschinen und Anlagen zu erreichen oder zu steigern und die Gesamtkosten zu minimieren. Fehlentscheidungen haben häufig nicht nur wirtschaftliche Folgen, sondern bergen auch ein potenzielles Sicherheitsrisiko.



*Abb. 1:
Typische Anwendung
der Druckmess-
technik: Pneumatik-
und Hydraulik-
anwendung in der
Fabrikautomation*

Um die Eignung eines elektronischen Druckmessgeräts einschätzen zu können, sollten Anwender oder Konstrukteure über die physikalischen Druckmessprinzipien, die Vor- und Nachteile verschiedener Sensorprinzipien für den geplanten Einsatzzweck und über die wichtigsten Grundlagen der Gerätetechnik informiert sein. Die Auswahl eines Druckmessgeräts beruht u. a. auf Kriterien wie dem Messbereich, dem Druck- oder auch Prozessanschluss, dem elektrischen Anschluss, den Ausgangssignalen sowie der Messgenauigkeit. In diesem Buch ist das nötige technische Hintergrundwissen, um Angaben aus Datenblättern einordnen und vergleichen zu können, leicht verständlich und anschaulich aufbereitet.

Geräteeignung

Druck und Druckmessung

In technischen Prozessen werden Systemzustände mit Hilfe von physikalischen Zustandsgrößen wie z. B. der Temperatur und dem Druck beschrieben, um nur zwei der wichtigsten zu nennen. Häufig gemessene Drücke sind der Schweredruck einer Flüssigkeitssäule und der atmosphärische Luftdruck.

Definition des Drucks

Allgemein ist der Druck folgendermaßen definiert: Greift senkrecht zu einer Fläche eine flächenhaft verteilte Kraft an, dann bezeichnet man den Quotienten aus dem Betrag der Kraft F zur Größe der Fläche A als Druck p :

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Zur Übertragung von Druck eignen sich inkompressible Medien wie Flüssigkeiten, zur Speicherung von Energie in Form von Druckarbeit kompressible Medien wie z. B. Gase.

Internationale Druckeinheiten

SI-Einheit

Die abgeleitete SI-Einheit für den Druck ist das Pascal (Einheitenzeichen Pa), das sich gemäß obiger Gleichung auch durch die SI-Einheiten Newton (Einheitenzeichen N) und Meter ausdrücken lässt:

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10^{-5} \text{ bar} \quad (2)$$

Europa

Das Bar (Einheitenzeichen bar) ist die im europäischen Raum gebräuchlichste Einheit für den Druck. Mit dieser gesetzlich zulässigen und SI-konformen Einheit lassen sich die im Alltag und in der Technik üblichen größeren Drücke mit

Druckeinheit	Umrechnung	
1 bar	10 ⁵ Pa	1000 mbar
1 psi	6895 Pa	68,95 mbar
1 MPa	10 ⁶ Pa	10 bar
1 kg/cm ²	0,0981 MPa	0,981 bar

*Tab. 1:
Internationale
Druckeinheiten*

kleinen Zahlenwerten formulieren. Im nordamerikanischen Raum ist hingegen die Druckeinheit »pound(-force) per square inch« (Einheitenzeichen psi) gebräuchlich. Vor allem im asiatischen Raum sind Megapascal (Einheitenzeichen MPa) und »kilogram(-force) per square centimetre« (Einheitenzeichen kg/cm²) übliche Einheiten. Tabelle 1 zeigt, wie die genannten Druckeinheiten zusammenhängen.

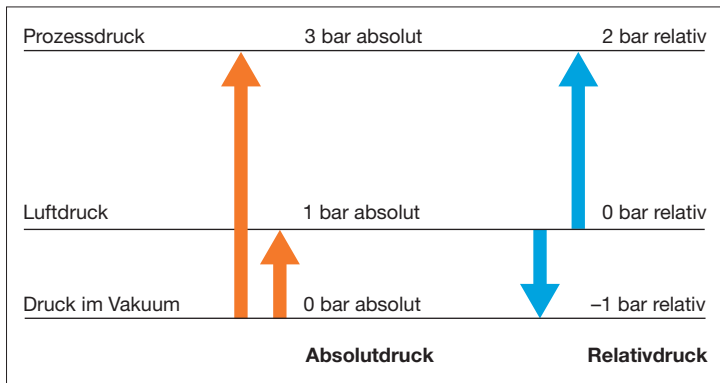
Nordamerika

Asien

Absolut-, Relativ- und Differenzdruck

Mit dem Absolutdruck, dem Relativdruck und dem Differenzdruck gibt es drei Messgrößen, die sich in ihren Bezugspunkten, d.h. im jeweiligen Nullpunkt der Druckskala unterscheiden. Der Nullpunkt des Absolutdrucks ist stets der Druck, der im luftleeren Raum, d.h. im Vakuum herrscht (Abb. 2). Den Nullpunkt des

*Abb. 2:
Druckgrößen*



Relativdrucks bildet hingegen der jeweils herrschende lokale Luftdruck. Dieser beträgt auf Höhe des Meeresspiegels ungefähr 1 bar und sinkt mit zunehmender Höhe kontinuierlich. Er hängt zudem von der Wetterlage ab. Bei einigen Anwendungen stellt die Differenz zweier variabler Systemdrücke die eigentliche Messgröße dar. Man spricht dann von der Messung des Differenzdrucks. Als praktisches Beispiel sei die Überwachung der Druckdifferenz vor und hinter einem Filterelement genannt (s. *Grenzwertüberwachung*, S. 39 f.).

Prinzipien der elektronischen Druckmessung

Vom Druck zum elektrischen Signal

Für die elektronische Druckmessung ist ein Sensor erforderlich, der den zu messenden Druck oder auch die Druckänderung aufnimmt und über einen physikalischen Effekt genau und wiederholbar in ein elektrisches Signal umwandelt. Das elektrische Signal ist dann ein Maß für den einwirkenden Druck oder auch die Druckänderung. Im Folgenden werden vier wichtige Messprinzipien und ihre technische Umsetzung vorgestellt.

Resistive Druckmessung

Das Prinzip der resistiven Druckmessung beruht auf der Messung der Widerstandsänderung elektrischer Widerstände durch druckabhängige Verformung. Für den Widerstand eines elektrischen Leiters gilt folgende Gleichung:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (3)$$

R elektrischer Widerstand

ρ spezifischer Widerstand

l Länge

A Querschnittsfläche

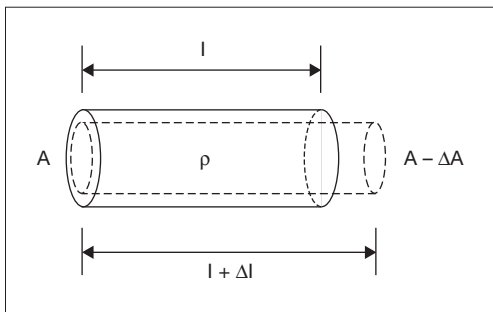


Abb. 3:
Änderung der
Abmessungen eines
zylindrischen Leiters
durch Dehnung

Dehnt eine Zugkraft den Leiter, nimmt seine Länge zu und seine Querschnittsfläche ab (Abb. 3). Weil der spezifische Widerstand eines metallischen Leiters eine (temperaturabhängige) Materialkonstante und damit geometrieunabhängig ist, steigt der elektrische Widerstand durch die Dehnung an. Bei einer Stauchung tritt der entgegengesetzte Effekt auf.

Umgesetzt wird das Prinzip der resistiven Druckmessung mit einem Grundkörper, der sich unter Druck kontrolliert verformt. Häufig weist dieser Grundkörper eine als Membran bezeichnete, gezielt geschwächte (dünne) Teilfläche auf. Das druckabhängige Ausmaß der Verformung wird mit metallischen Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen, d. h. typischerweise mäanderförmigen elektrischen Leitern aus Metall.

Üblicherweise sind vier DMS auf einer Membran aufgebracht. Einige befinden sich in gedehnten, andere in gestauchten Bereichen der Membran. Wölbt sich die Membran unter Druckeinwirkung, werden die DMS entsprechend verformt (Abb. 4). Der elektrische Widerstand nimmt dabei proportional zur Verformung zu (Dehnung) bzw. ab (Stauchung). Zur exakten Messung der Widerstandsänderung werden die DMS zu einer Wheatstone'schen Messbrücke verschaltet.

Membran ...

**... mit Metall-
DMS**

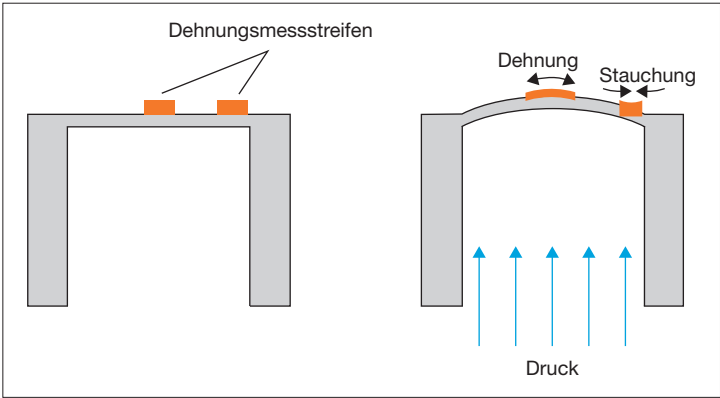


Abb. 4:
Verformung der
Sensormembran
unter Druck

Piezoresistive Druckmessung

Das Prinzip der piezoresistiven Druckmessung entspricht dem der resistiven Druckmessung. Weil die für dieses Messprinzip verwendeten DMS allerdings aus einem Halbleitermaterial bestehen, wirkt sich ihre Verformung durch Dehnen oder Stauchen primär in einer Änderung des spezifischen Widerstands aus. Nach Gleichung 3 (s. S. 8) ist der elektrische Widerstand proportional zum spezifischen Widerstand. Während der piezoresistive Effekt bei Metallen vernachlässigbar klein ist – und damit bei der resistiven Druckmessung praktisch keine Rolle spielt –, übertrifft er bei Halbleitern wie z. B. Silizium den Effekt der Längen- und Querschnittsänderung um einen Faktor zwischen 10 und 100.

Siliziummembran mit integrierten DMS

Anders als metallische DMS, die auf nahezu jedes Material aufgebracht werden können, werden die Halbleiter-DMS als Mikrostrukturen in die Membran integriert. Die DMS und der Verformungskörper basieren somit auf demselben Halbleitermaterial. Typischerweise werden vier DMS in eine Membran aus Silizium integriert und zur Wheatstone'schen Messbrücke verschaltet.

Da die Mikrostrukturen gegen viele Druckmedien nicht beständig sind, muss für die meisten Anwendungen der Sensorchip gekapselt werden. Der Druck muss dann indirekt auf das Halbleitersensorelement übertragen werden, z. B. über eine metallische Membran und Öl als Übertragungsmedium.

Aufgrund der Größe des piezoresistiven Effekts sind piezoresistive Sensoren auch in Bereichen niedrigster Drücke einsetzbar. Wegen der starken Temperaturabhängigkeit und der prozessbedingten Streuung ist allerdings eine individuelle Temperaturkompensation jedes einzelnen Sensors zwingend erforderlich.

Kapazitive Druckmessung

Das Prinzip der kapazitiven Druckmessung beruht auf der Messung der vom Plattenabstand abhängigen Kapazität eines Kondensators. Die Kapazität eines Zweiplattenkondensators ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (4)$$

C Kapazität des Zweiplattenkondensators

ε Dielektrizitätskonstante

A Fläche der Kondensatorplatte

d Plattenabstand

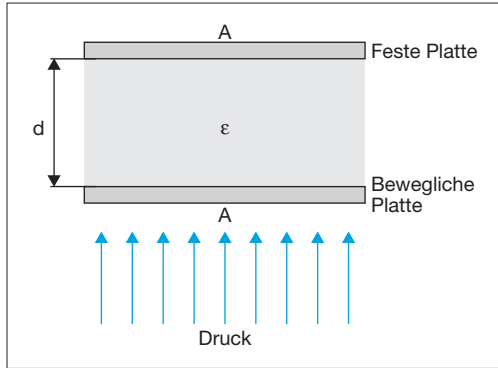
Umgesetzt wird das Prinzip der kapazitiven Druckmessung mit einem Grundkörper, dessen metallische oder leitend beschichtete Membran eine der beiden Platten eines Plattenkondensators bildet. Wird die Membran unter Druck ausgelenkt, verringert sich der Plattenabstand des Kondensators, wodurch dessen Kapazität – bei gleich bleibender Plattenfläche und Dielektrizitätskonstante – zunimmt (Abb. 5).

Kapselung des Sensorelements

Membran als bewegliche Kondensatorplatte

12 Druck und Druckmessung

Abb. 5:
Kapazitives
Messprinzip



Auf diese Weise lassen sich Drücke mit hoher Empfindlichkeit messen. Die kapazitive Druckmessung eignet sich deshalb auch für sehr niedrige Drücke bis in den einstelligen Millibarbereich. Weil die bewegliche Membran höchstens bis zur unbeweglichen Platte des Kondensators ausgelenkt werden kann, ergibt sich eine hohe Überlastsicherheit kapazitiver Drucksensoren. Einschränkungen in der Realisierung der Sensoren ergeben sich durch das Membranmaterial und dessen Eigenschaften sowie die erforderlichen Verbindungs- und Dichttechniken.

Piezelektrische Druckmessung

Das Prinzip der piezelektrischen Druckmessung beruht auf dem gleichnamigen kristallphysikalischen Effekt, der nur bei einigen elektrisch nichtleitenden Kristallen wie z.B. einkristallinen Quarzkristallen auftritt. Wird auf einen solchen Kristall eine Druck- oder Zugkraft in definierter Richtung ausgeübt, laden sich bestimmte entgegengesetzt orientierte Flächen des Kristalls positiv bzw. negativ auf. Durch die Verschiebung der elektrisch geladenen Gitterbausteine entsteht ein elektrisches Dipolmoment, das sich im Auftreten der

Piezokristalline Membran

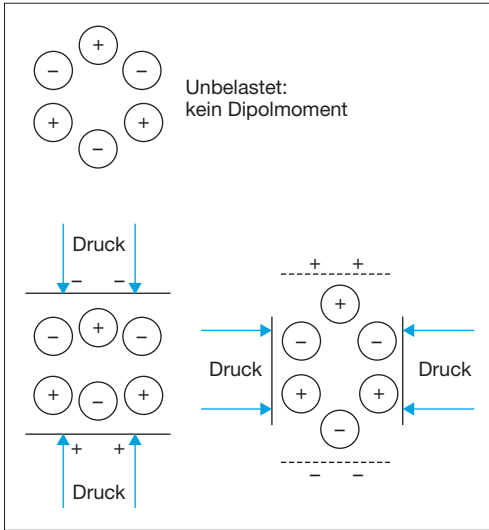


Abb. 6:
Piezoelektrischer
Effekt

(scheinbaren) Oberflächenladungen zeigt (Abb. 6). Die Ladungsmenge ist proportional zum Betrag der Kraft, ihre Polarität hängt von der Krafrichtung ab. Die von den Oberflächenladungen erzeugte elektrische Spannung kann abgegriffen und verstärkt werden.

Der piezoelektrische Effekt eignet sich nur für die Messung dynamischer Drücke. In der Praxis beschränkt sich die piezoelektrische Druckmessung deshalb auf Spezialanwendungen.

Messung von Druck- änderungen

Sensortechnik

Im Folgenden werden die drei gebräuchlichsten Sensorprinzipien (Abb. 7) beschrieben. Mit dem Metall-Dünnschicht- und dem Keramik-Dickschicht-Sensor handelt es sich um die beiden gängigsten Umsetzungen der resistiven

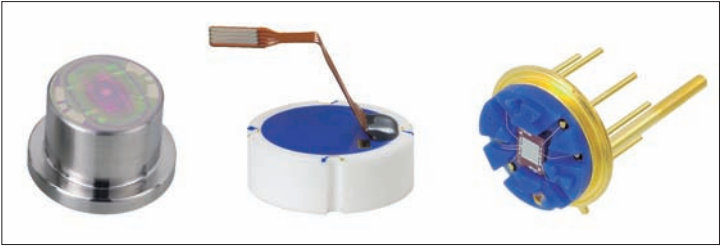


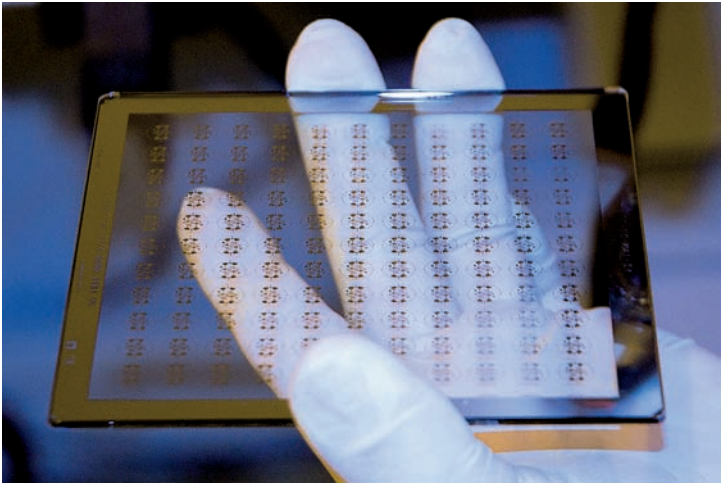
Abb. 7:
Metall-Dünnschicht-Sensor (links), Keramik-Dickschicht-Sensor (Mitte) und offener piezoresistiver Sensor (rechts)

Druckmessung. Ihre wesentlichen Unterschiede ergeben sich durch die verwendeten Materialien und deren Eigenschaften. Als drittes Sensorprinzip wird der piezoresistive Drucksensor vorgestellt.

Metall-Dünnschicht-Sensor

Herstellung

Der Grundkörper und die Membran eines Metall-Dünnschicht-Sensors bestehen typischerweise aus Edelstahl. Sie können durch zerspanendes Bearbeiten in Präzisionsdrehautomaten mit anschließendem Schleifen, Polieren und Läppen der Membran in der erforderlichen Materialstärke hergestellt werden. Auf der dem Medium abgewandten Membranseite werden Isolierschichten, Dehnungsmessstreifen, Kompensationswiderstände und Leiterbahnen mit einer Kombination aus chemischen (CVD) und physikalischen Verfahren (PVD) aufgebracht und fotolithografisch durch Ätzen strukturiert (Abb. 8). Diese Prozesse laufen unter Reinraumbedingungen und in speziellen Anlagen



zum Teil unter Vakuum oder in inerter Atmosphäre ab, um atomar hochreine Strukturen zu erzeugen. Die auf dem Sensor entstehenden Widerstände und elektrischen Leiterbahnen sind deutlich kleiner als ein Mikrometer und werden deshalb als Dünnschichtwiderstände bezeichnet.

Der Metall-Dünnschicht-Sensor ist aufgrund der verwendeten Materialien sehr beständig. Außerdem ist er unempfindlich gegen Schock- und Vibrationsbelastungen sowie dynamische Druckanteile. Da die eingesetzten Materialien schweißbar sind, kann der Sensor ohne zusätzliche Dichtwerkstoffe hermetisch dicht auf den Druckanschluss aufgeschweißt werden. Aufgrund der Duktilität der Materialien besitzt der Sensor einen verhältnismäßig niedrigen Überlastbereich bei sehr hohem Berstdruck.

Keramik-Dickschicht-Sensor

Der Grundkörper und die Membran des Keramik-Dickschicht-Sensors bestehen aus einer Keramik. Wegen seiner Beständigkeit und gu-

*Abb. 8:
Fotomaske, um
Widerstandsstruk-
turen auf Sensormem-
branen zu erzeugen*

Besondere Eigenschaften

Fertigungs- prozesse

ten Verarbeitbarkeit hat Aluminiumoxid (Al_2O_3) große Verbreitung gefunden. Die vier Dehnungsmessstreifen werden als Dickschichtpaste im Siebdruckverfahren auf die dem Druckmedium abgewandte Seite der Membran aufgebracht und anschließend bei hohen Temperaturen eingebrennt sowie durch eine Schutzschicht passiviert. Während des Siebdrucks und des Einbrennprozesses dürfen keine Verunreinigungen auftreten. Deshalb erfolgt die Fertigung typischerweise im Reinraum (Abb. 9). Nur die führenden Hersteller können ihre Fertigungsanlagen sortenrein fahren, um jegliche Kreuzkontamination zu vermeiden und damit die Prozessstabilität hoch zu halten.

*Abb. 9:
Sensorfertigung im
Reinraum*



Besondere Eigenschaften

Die Keramik des Sensors ist sehr korrosionsbeständig. Allerdings erfordert der Einbau des Sensors in das Gehäuse eines Druckmessgeräts grundsätzlich eine zusätzliche Dichtung zum Druckanschluss, die nicht gegenüber allen Medien beständig ist. Zudem ist die Keramik spröde, weshalb der Berstdruck geringer ist als bei einem Metall-Dünnschicht-Sensor.

Piezoresistiver Sensor

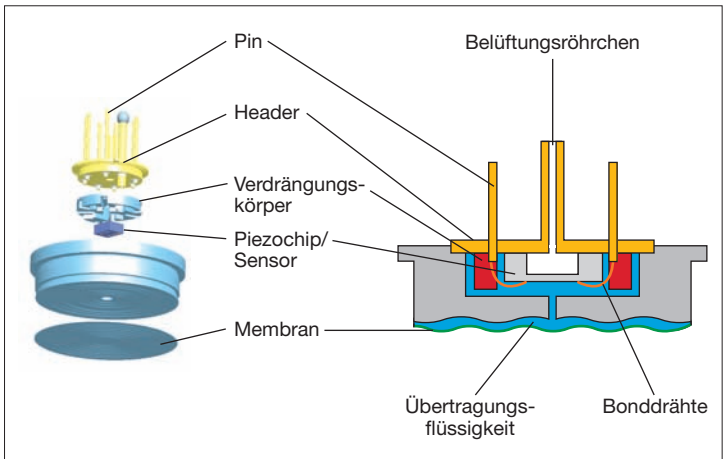
Ein piezoresistiver Sensor ist weitaus komplexer aufgebaut als die zuvor beschriebenen Sensoren. Das Sensorelement wird von einem Siliziumchip gebildet. Dieser Chip besteht aus einer mit piezoresistiven Widerständen strukturierten Membran, die sich unter Druck wölbt. Mit einer Fläche von nur wenigen Quadratmillimetern ist er sehr viel kleiner als z. B. die Membranen von Metall-Dünnschicht- oder Keramik-Dickschicht-Sensoren.

Der Piezochip ist sehr empfindlich gegenüber äußeren Einflüssen und muss deshalb in den meisten Fällen hermetisch gekapselt werden (Abb. 10). Dazu wird er druckdicht in ein Edelstahlgehäuse eingebaut, das frontseitig mit einer dünnen Edelstahlmembran verschlossen ist. Das freie Volumen zwischen dem Piezochip und der (äußeren) Membran wird mit einer Übertragungsflüssigkeit gefüllt. Typischerweise handelt es sich dabei um ein synthetisches Öl. Bei einem gekapselten piezoresistiven Sensor tritt das Druckmedium also

Aufbau

Kapselung

Abb. 10:
Aufbau eines gekapselten piezoresistiven Sensors



nur mit einer Edelstahlmembran in Kontakt, die den Druck über das Öl an die (innere) Chipmembran überträgt.

Um den Einfluss der Temperaturexpansion der Übertragungsflüssigkeit auf die Druckmessung zu minimieren, muss die Gestalt des Sensors so optimiert werden, dass das freie innere Volumen bei gegebener Kontur der Edelstahlmembran minimal ist. Unter anderem werden dazu spezielle Verdrängungskörper eingesetzt. Für die Montage und Kontaktierung des Sensorchips wird typischerweise ein so genannter Header eingesetzt. Dieser verfügt über integrierte Glas-Metall-Durchführungen für die elektrische Verbindung zwischen dem Innen- und Außenraum und kann hermetisch dicht mit dem Gehäuse verschweißt werden. Das auf die Rückseite des Headers geklebte Sensorelement ist über Bonddrähte mit den Pins verbunden (Abb. 11) und leitet über diese die elektrischen Signale des Sensorelements an die angeschlossene Elektronik im Außenraum des Sensors weiter. In der Mitte des Headers befindet sich

Kontaktierung

*Abb. 11:
Bonden des
Siliziumchips
und Headers*



ein Belüftungsröhrchen, das auf die Rückseite der Sensormembran führt. Wird der Raum hinter dem Sensorelement evakuiert und das Belüftungsröhrchen verschlossen, lassen sich so mit einem piezoresistiven Sensor Absolutdrücke messen, da das Vakuum des Hohlraums als Druckreferenz dient. Bei Sensoren für relative Druckmessungen bleibt das Belüftungsröhrchen offen und sorgt dadurch für eine dauernde Belüftung der Rückseite der Membran, sodass immer relativ zum lokalen Luftdruck gemessen wird. Die Belüftung erfolgt ins Innere des Druckmessgeräts oder über das belüftete Kabel ins Freie. Das Belüftungsröhrchen ist sorgfältig vor Verschmutzung, insbesondere vor eindringender Feuchtigkeit zu schützen, da der Sensor darauf überaus empfindlich reagieren würde und unter Umständen sogar funktionsunfähig werden könnte.

Messung von Absolut- oder Relativdrücken

Sensorprinzipien im Vergleich

Es gibt kein ideales Sensorprinzip, denn jedes besitzt bestimmte Vor- und Nachteile (Tab. 2). Welcher Sensor für eine Anwendung geeignet

Tab. 2: Sensorprinzipien im Vergleich

Anforderung	Sensorprinzip		
	Metall-Dünnschicht-Sensor	Keramik-Dickschicht-Sensor	Piezoresistiver Sensor
Messung des Absolutdrucks	○	⊙	●
Bereiche sehr niedriger Drücke	○	○	●
Bereiche sehr hoher Drücke	●	○	○
Schock- und Vibrationsfestigkeit	●	⊙	⊙
Langzeitstabilität	●	⊙	●
● Anforderung erfüllt ⊙ Anforderung bedingt erfüllt ○ Anforderung nicht erfüllt			

Auswahl eines geeigneten Sensors

ist, richtet sich im Wesentlichen nach den Anforderungen der Applikation. Entscheidend für die Eignung ist nicht nur das zugrunde liegende Sensorprinzip, sondern vor allem auch dessen praktische Umsetzung. Je nach Anforderungen erschweren oder erleichtern die beschriebenen Sensorprinzipien allerdings die Umsetzung.

Von fundamentaler Bedeutung sind das vom Druckmedium berührte Material und dessen Eignung für bestimmte Medien. So hat z. B. der Keramik-Dickschicht-Sensor gegenüber dem Metall-Dünnschicht-Sensor den Nachteil, dass eine zusätzliche Dichtung zwischen dem nichtmetallischen Membranmaterial und dem Gehäuse erforderlich ist. Dies steht einer universellen Einsetzbarkeit fast immer entgegen. Die Produktprogramme der Sensorhersteller sind meist nach derartigen Abwägungen auf verschiedene Anwendungen zugeschnitten und optimiert. Lediglich bei Universalgeräten bleibt es dem Anwender überlassen, das geeignete Sensorprinzip selbst zu wählen. Führende Hersteller bieten dabei kompetente Unterstützung.

Druckmessgeräte

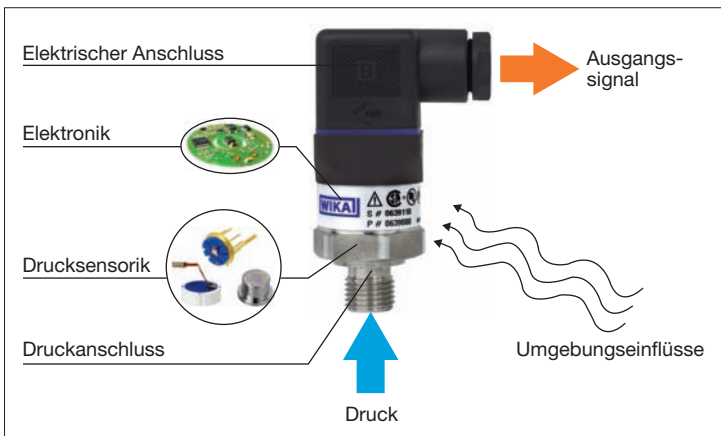
Dieses Kapitel stellt die gebräuchlichsten Bauarten elektronischer Druckmessgeräte vor und gibt einen Einblick in die Auslegung im Hinblick auf lange Lebensdauer. Anschließend wird die Funktionssicherheit unter Umwelteinflüssen und ihre Sicherstellung durch Produkttests thematisiert.

Gerätebauarten im Überblick

Gebräuchliche Bauarten sind der Druckmessumformer, die Pegelsonde, der Druckschalter und der Drucktransmitter. Prinzipiell bestehen diese elektronischen Druckmessgeräte aus einem Druckanschluss, der Drucksensorik, einer Elektronik, einem elektrischen Anschluss und dem Gehäuse (Abb. 12).

Neben den genannten gibt es auch einfachere Bauarten, die als Drucksensormodule oder Transducer bezeichnet werden und häufig aus nicht mehr als dem Drucksensor und einfachen mechanischen und elektrischen Schnittstellen

*Abb. 12:
Aufbau eines Druckmessgeräts*



bestehen. Diese Bauarten eignen sich besonders zur vollständigen Integration in Anwendersysteme.

Standardgerät und -funktio- nalität

Druckmessumformer

Ein Druckmessumformer (Abb. 13) verfügt sowohl prozessseitig als auch auf der Seite des elektrischen Ausgangssignals über standardisierte Schnittstellen und wandelt die physikalische Größe Druck in ein Standard-Industriesignal um. Über den Druckanschluss wird der Druck definiert auf den Sensor gelenkt. Der Druckanschluss verfügt über ein (standardisiertes) Gewinde und ein integriertes Dichtsystem,

Abb. 13:
Druckmessumformer



tem, um den Druckmessumformer an der jeweiligen Messstelle einfach einschrauben zu können. Ein passendes Gehäuse schützt den Sensor und die Elektronik vor Umgebungseinflüssen. Die Elektronik formt aus dem schwachen Sensorsignal ein normiertes und temperaturkompensiertes Signal, wie z.B. das bekannte Industriesignal 4...20 mA. Das Ausgangssignal wird über einen (standardisierten) Stecker oder ein Kabel an die nachfolgende Signalauswertung weitergeleitet.

Abb. 15:
Druckschalter mit
Display



Display und zusätzlich über ein analoges Ausgangssignal. Am Display können dann die eingestellten Parameter und der anliegende Druck abgelesen werden. Der gemessene Druck kann zusätzlich über das analoge Ausgangssignal an eine nachgeschaltete Steuer- oder Regeleinheit weitergegeben werden. Bei dieser weit verbreiteten Art eines elektronischen Druckschalters handelt es sich also um einen Schalter, einen Druckmessumformer und eine Digitalanzeige in einem Gerät (Abb. 15).

Individuell einstellbar

Drucktransmitter

Der oft auch als Prozesstransmitter bezeichnete Drucktransmitter (Abb. 16) ist ein Druckmessumformer, dessen Messbereich sich innerhalb eines vordefinierten Druckintervalls einstellen lässt (Turndown). Er wird vor allem in der Prozess- und Verfahrenstechnik eingesetzt, denn in diesem Anwendungsbereich muss jede einzelne Messstelle an eine Vielzahl spezifischer Anforderungen angepasst und vom Betreiber vor Ort individuell realisiert werden. Drucktransmitter



Abb. 16:
Drucktransmitter
mit Display

verfügen dazu über eine sehr hohe Messgenauigkeit innerhalb des gesamten Messbereichs. Neben dem Messbereich können typischerweise auch der Nullpunkt und weitere Parameter individuell eingestellt werden. Viele Drucktransmitter verfügen dazu sowohl über eine Digitalanzeige als auch über zusätzliche Bedienelemente sowie umfangreiche Betriebssoftware direkt im Gerät.

Drucksensormodule

Anbieter von Drucksensormodulen stellen meist eine Vielzahl von Sensormodulen zur Verfügung, die direkt an die Anforderungen des Anwenders angepasst werden können. Sie besitzen z. B. einen anwenderspezifischen Druckanschluss und/oder eine anwenderspezifische elektrische Schnittstelle (Abb. 17). Nur wenige

Anwenderspezifische Ausstattung

Abb. 17:
Drucksensormodule



Hersteller elektronischer Druckmesstechnik bieten sogar den »nackten« Drucksensor als Baugruppe an, für die der Anwender eigene konstruktive Lösungen entwickeln muss, um den Druck zum Sensor zu bringen und das Sensorsignal auszuwerten.

Für Drucksensormodule gilt allgemein, dass ihre Funktion durch konstruktive Maßnahmen des Anwenders sichergestellt werden muss. Deshalb eignet sich diese Bauart üblicherweise nur für Großseriengeräte.

Gerätequalifikation und -zuverlässigkeit

Um elektronische Druckmessgeräte für eine bestimmte Anwendung zu qualifizieren, ist eine ganze Reihe von Betrachtungen erforderlich. Von fundamentaler Bedeutung ist dabei die erforderliche Zuverlässigkeit bzw. Lebensdauer des Geräts unter den zu erwartenden Einsatzbedingungen. Unter der (mittleren) Lebensdauer versteht man die mittlere Zeitspanne des störungsfreien Betriebs bis zum Ausfall (MTTF). Sie hängt entscheidend von den Betriebsbedingungen ab. Je nach den Betriebsbedingungen können sich die Ausfallwahr-

Mittlere Lebensdauer: MTTF

scheinlichkeiten der einzelnen Baugruppen eines elektronischen Druckmessgeräts erheblich unterscheiden.

Druckanschluss

Druckanschlüsse sind weitgehend genormt, einfach zu dimensionieren und leicht zu beherrschen. Bei Drücken bis zu 1000 bar gelten die meisten als ausfallsicher, d. h., sie bieten praktisch unbegrenzte Lebensdauer. Allenfalls bei Dichtungen, und hier insbesondere bei solchen aus organischem Material, ist mit gewissen Alterungseffekten zu rechnen. Sofern aber das Druckmedium materialverträglich ist und der Betriebstemperaturbereich nicht überschritten wird, treten kaum ernsthafte Probleme auf. Detaillierte Informationen zur Medienbeständigkeit sind der einschlägigen Fachliteratur und Herstellerangaben zu entnehmen.

Medien- beständigkeit

Sensorsystem

Bei der Beurteilung der Lebensdauer des Sensorsystems (Dauerlastwechselfestigkeit) ist nach den verschiedenen Sensorarten zu differenzieren. Da diese ganz unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt sind und die eingesetzten Materialien bzw. Materialpaarungen sich zum Teil völlig unterschiedlich verhalten, ist eine differenzierte Betrachtung unumgänglich.

Metall-Dünnsfilm-Sensoren

Der klassische Metall-Dünnsfilm-Sensor stellt ein klar definiertes System dar. Der Grundkörper einschließlich der Schweißnaht wird üblicherweise überdimensioniert, um dauerhaft stabile Verhältnisse an der Membran und damit eine lange Lebensdauer zu gewährleisten. Die Dimensionierung der Membrangeometrie und die Positionierung der Dehnungsmessstreifen werden mit der Finite-Elemente-

FEM-Simulation

Methode (FEM) optimiert. Dadurch erreicht man, dass sich die Membran bei radialen und tangentialen Spannungen über einen großen Lastbereich linear mit dem Druck verformt und sich Drücke genau messen lassen. Da es sich bei den eingesetzten Materialien überwie-

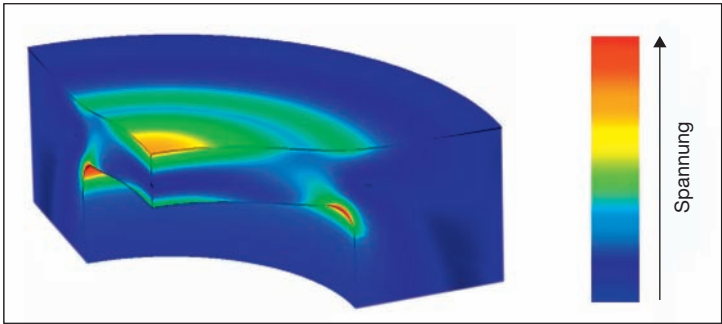


Abb. 18:
*FEM-Simulation der
Vergleichsspannung
auf der verformten
Membran eines
Metall-Dünnsfilm-
Sensors*

gend um duktile Stähle oder Speziallegierungen handelt, kann durch FEM-Simulationen auch gewährleistet werden, dass die Verformung des Membranmaterials im gesamten Messbereich weit unterhalb der Streckgrenze bleibt (Abb. 18). Lokale Überlastungen mit entsprechender Plastifizierung sind daher ausgeschlossen.

Dauerschwing- versuch

Die Dauerlastwechselfestigkeit lässt sich durch klassische Verfahren wie den Dauerschwingversuch ermitteln, dessen Ergebnisse die Wöhler-Kurve veranschaulicht. Bei namhaften Herstellern gelten 10^8 Lastwechsel als sicheres Auslegungskriterium. Insbesondere bei Neuentwicklungen, Geometrievariationen oder Materialwechslern verzichtet trotz dieser großen Zahl kein Hersteller auf die Absicherung der Auslegung durch empirische Daten aus zum Teil wochen- oder monatelangen Dauerversuchen auf Lastwechselprüfständen – allein deshalb, weil neben der reinen Spannungsverteilung auch Herstellungsverfahren wie die ther-

mische Behandlung des Stahls und Umformverfahren sowie herstellungsbedingte Oberflächendefekte wie Riefen erheblichen Einfluss haben können.

Keramik-Dickschicht-Sensoren

Auch der Grundkörper des Keramik-Dickschicht-Sensors wird überdimensioniert. Zu beachten sind allerdings zwei materialbedingte Unterschiede: Zum einen ermüdet (altert) die Keramik des Grundkörpers anders als Stahl nicht, sofern sie nicht überbelastet oder durch mechanischen oder thermischen Schock zusätzlich belastet wird. Fehlstellen, wie etwa geringe Unreinheiten oder mikroskopisch kleine mechanische Defekte an der Oberfläche, haben jedoch eine dramatische Veränderung der Berstdruckfestigkeit zur Folge und müssen deshalb im Produktionsprozess sorgfältig überwacht werden. Zum anderen benötigen die keramischen Grundkörper eine sorgfältig dimensionierte Halterung oder Aufnahme und eine zusätzliche Dichtung im Übergang zum Druckkanal. Typischerweise stellt die Alterung dieser Dichtung unter dem Einfluss von Last- und Temperaturwechseln sowie den in der Anwendung eingesetzten Medien das begrenzende Moment dar. Häufig bleibt deshalb keine andere Wahl, als die Lebensdauer und damit Eignung durch Lastwechseltests individuell zu ermitteln, insbesondere unter dem Einfluss der Medien- und Umgebungstemperatur.

Piezoresistive Sensoren

Für piezoresistive Sensoren gilt zum Teil Ähnliches wie für Keramik-Dickschicht-Sensoren. Während das Sensormaterial selbst kaum zur Ermüdung neigt, muss die übrige Konstruktion des Sensorsystems sorgfältig konzipiert und z. B. durch eine Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) im Detail auf potenzielle

**Lastwechseltests
unter Temperatureinfluss**

FMEA

Individuelle Lastwechseltests

Risiken bewertet werden. Dies betrifft sowohl die Konstruktion und Ausführung des so genannten Druckmittlers, bestehend aus Membran, Kapselgehäuse mit Membranbett und Druckkanal sowie Verdrängungskörper, als auch die Gestaltung des Headers und der Aufnahme für den Piezochip und die eingesetzten Fügeverfahren. Lastwechseltests, insbesondere bei höheren Druckbereichen, sind daher auch für piezoresistive Sensoren unabdingbar. Die Systeme sind aber so komplex, dass in der Regel individuelle Tests notwendig sind.

Elektronik

Für die in der elektronischen Druckmesstechnik eingesetzten Schaltungen und elektronischen Bauteile gelten keine spezielleren Dimensionierungsrichtlinien als für Standard-



Abb. 19:
Maschine zur Durchführung des Highly Accelerated Life Test (HALT)

Industrieelektronik. Selbstverständlich ist der Zusammenhang zwischen der Anzahl der verwendeten Bauelemente und der Anzahl der erforderlichen Lötstellen sowie die starke Abhängigkeit der Lebensdauer elektronischer Bauteile von der Temperatur zu berücksichtigen. Für die Lebensdauerberechnung kann auf bewährte Standardverfahren zurückgegriffen werden. Weil die damit typischerweise erzielten MTTF-Werte von einigen hundert Jahren nicht experimentell bestätigt werden können, werden Verfahren der beschleunigten Alterung herangezogen (Abb. 19).

Gerätetests

Um die Funktionalität elektronischer Druckmessgeräte unter allen Umwelteinflüssen zu gewährleisten, werden in den Entwicklungslabors der großen Hersteller regelmäßig lange Reihen verschiedenster Tests durchgeführt. Einige Testverfahren, wie die für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), sind gesetzlich vorgeschrieben. Ohne Bestehen dieser Tests dürfen die Geräte nicht in Verkehr gebracht werden. Andere Tests werden durchgeführt, um den jeweiligen Marktanforderungen bzw. den spezifischen Einsatzbedingungen gerecht zu werden. Sind Normen oder Richtlinien zu bestimmten Tests vorhanden, werden diese herangezogen. Liefern die Normen keine passenden Testverfahren, werden häufig marktspezifische und anwendungsorientierte Tests entwickelt.

Für marktspezifische Testverfahren werden die Bedingungen der Anwendung möglichst genau nachgebildet. Die Testobjekte werden häufig nicht nur einem Einzeltest unterzogen, sondern müssen eine ganze Reihe von Tests bestehen. Sie werden z. B. zuerst starker Vibration ausgesetzt (Abb. 20) und müssen anschließend großen Schocks standhalten. Oder sie werden

EMV-Tests

Applikations-spezifische Tests

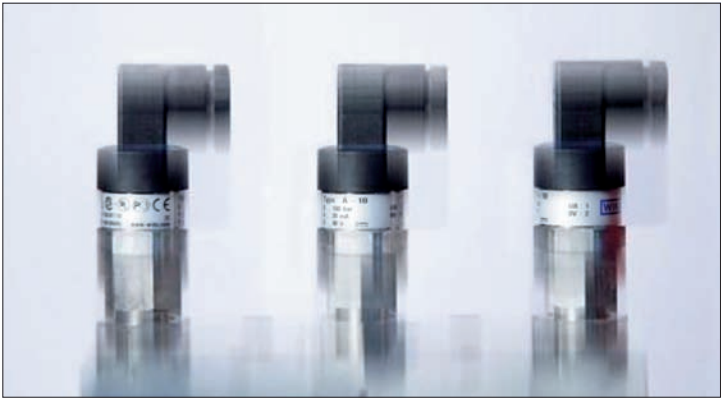


Abb. 20:
Vibrationstest

nacheinander erhitzt, gekühlt, in Wasser eingetaucht, Salzsprühnebel ausgesetzt und mit Lösungsmitteln oder Betriebs- und Hilfsstoffen bepinselt. Ein Gerät hat die Testreihe nur dann bestanden, wenn es während der Tests und auch anschließend mit der ursprünglichen Genauigkeit misst. Diese Art von erweitertem Produkttest wird üblicherweise »applikations-spezifischer Standardprüfprozess« genannt. Weil die Testinhalte und -abläufe von jedem Hersteller selbst festgelegt werden, müssen sie vom Anwender grundsätzlich erfragt und individuell beurteilt werden.

Umwelteinflüsse und besondere Anforderungen

Einfluss der Temperatur

Weil die Temperatur viele Materialeigenschaften beeinflusst, wirkt sie sich auch auf die Funktion von Messgeräten aus. Sehr hohe und sehr tiefe Temperaturen können Teile des Messgeräts beschädigen oder sogar zerstören. Insbesondere Kunststoffteile und Dichtmaterialien altern unter dauerhaft hohen oder niedri-

gen Temperaturen schneller. Bei zu niedrigen Temperaturen verlieren sie z.B. ihre elastischen Eigenschaften.

Um die Funktion ihrer Druckmessgeräte sicherzustellen, schreiben einige Hersteller in den Datenblättern Temperaturbereiche für das Druckmedium, für die Umgebung und für die Lagerung vor. Andere Hersteller geben den Betriebstemperaturbereich an, der das Medium und die Umgebung einschließt. Bei Einhaltung dieser Vorgaben wird das Messgerät nicht beschädigt. Die in den Datenblättern spezifizierten Angaben zur Messgenauigkeit (s. S. 58 ff.) gelten hingegen ausschließlich für den – ebenfalls in den Datenblättern angegebenen – wesentlich engeren temperaturkompensierten Bereich.

Hersteller- vorgaben

Verträglichkeit mit dem Druckmedium

So zahlreich die Anwendungen der Druckmesstechnik, so vielfältig und verschiedenartig sind die Druckmedien. In der Pneumatik handelt es sich meist um Luft, vermischt mit Resten von Kompressoröl und kondensiertem Wasser, bei der Füllstandsmessung oft um Treibstoffe, Öle oder Chemikalien. In der Hydraulik ist der Druck des Hydrauliköls zu messen, in der Kältetechnik der des eingesetzten Kältemittels.

Sämtliche physikalischen und chemischen Eigenschaften des Druckmediums sind bei der Wahl des Materials und der sonstigen Beschaffenheit der mit dem Druckmedium in Kontakt kommenden Teile des Druckmessgeräts zu berücksichtigen. Besonders zu beachten ist, dass Membranen nur wenige Mikrometer dick sind. Ein Materialabtrag durch Korrosion ist inakzeptabel; nicht nur weil die Membran »weggefressen« würde, sondern auch, weil sich die messtechnischen Eigenschaften kontinuierlich verändern würden. Wegen der geringen Mate-

Membran

rialstärke besteht aber auch die Gefahr, dass das Medium durch die Membran hindurchdiffundiert und mit dahinter liegenden Materialien wie z. B. Füllmedien und Klebstoffen reagiert.

Damit aggressive Medien keine chemischen Reaktionen hervorrufen, werden z. B. frontbündige Edelstahlmembranen häufig mit einer besonders beständigen Beschichtung aus Spezialkunststoffen, keramischen Stoffen oder Edelmetallen versehen. Alternativ bestehen die medienberührenden Bauteile aus Titan oder einem Spezialwerkstoff z. B. auf Nickel-Molybdän- oder Kobaltbasis.

Druckanschluss

Die Reaktivität des Druckmediums ist jedoch nur ein Aspekt unter mehreren. Fließt z. B. als Druckmedium verwendetes Wasser nicht restlos ab, kann es zur Beschädigung einer innenliegenden Sensormembran kommen, wenn das Wasser gefriert und sich dabei ausdehnt. Auch können Kalkablagerungen den Druckkanal verstopfen. Einige Medien, z. B. solche mit hoher Viskosität oder hohem Feststoffanteil, erfordern einen Druckanschluss ohne Druckkanal. Dazu wird die Sensormembran frontbündig gestaltet (s. S. 52 f.).

Schutz gegen Schmutz und Wasser

Die elektronischen Bauteile und elektrischen Anschlüsse müssen vor dem Eindringen von Fremdkörpern und Wasser geschützt werden, um ihre Funktion dauerhaft sicherstellen zu können. Die in der Norm DIN EN 60529 festgelegten IP-Schutzarten geben an, welchen Schutz ein elektrisches oder elektronisches Gerät bei Raumtemperatur gegen Berühren und das Eindringen von Fremdkörpern (1. Ziffer) sowie gegen das Eindringen von Wasser (2. Ziffer) bietet. Eine höhere IP-Schutzart stellt jedoch nur bedingt den besseren Schutz dar. So schließt z. B. die Schutzart IP67 (staub-

IP-Schutzart

dicht, Schutz gegen zeitweiliges Untertauchen) nicht die Schutzart IP65 (staubdicht, Schutz gegen Strahlwasser) ein, denn die Belastung durch Strahlwasser kann erheblich größer sein als die durch zeitweiliges Untertauchen. Für die Schutzart IP68 (staubdicht, Schutz gegen dauerndes Untertauchen) müssen immer zusätzlich die Dauer und Tiefe des Untertauchens vom Hersteller angegeben werden. Diese Bedingungen sind in der Norm nicht festgelegt. Die Ursache von Dichtheitsproblemen kann auch in Temperaturänderungen liegen. Deshalb stellen einige Hersteller durch verschiedene Testsequenzen sicher, dass die Messgeräte auch nach Temperaturwechseln funktionsfähig bleiben und innerhalb der spezifizierten Genauigkeitsgrenzen messen.

Der Einsatz von Druckmessgeräten im Freien stellt besonders hohe Anforderungen: So kann eine Kombination aus hoher Luftfeuchtigkeit und niedriger Temperatur zur Kondensation oder sogar Vereisung führen. Starke zyklische Klimaschwankungen können bei nicht dicht verschlossenen Geräten zur Ansammlung von Feuchtigkeit im Gerät führen (Pumpeffekt).

Zu starker Bildung von Feuchtigkeit (Dauerkondensation) am und teilweise auch im Messgerät kommt es regelmäßig dann, wenn bei hoher Luftfeuchtigkeit die Temperatur des Druckmediums viel geringer ist als die der Umgebung. Abhilfe schafft hier nur eine ganz spezielle Gehäusekonstruktion, die nur bei bestimmten, für derartige Einsatzbedingungen optimierten Geräten realisiert ist.

Gehäuse- konstruktion

Mechanische Belastbarkeit

In vielen Anwendungen sind Druckmessgeräte teilweise erheblichen Vibrations- und Schockbelastungen ausgesetzt. Bei Ersteren handelt es sich um schwingende mechanische Belastungen, die über einen längeren Zeitraum an-

halten. Als Schock bezeichnet man hingegen eine Stoßwelle, die im Gegensatz zur Vibration schnell abklingt. Starke Vibrationen wirken z. B. bei der Anwendung von Druckmessgeräten an Prüfständen und Motoren. Schocks entstehen z. B. beim mobilen Einsatz in einem Fahrzeug, das über Bodenwellen rollt, oder beim stationären Einsatz in Maschinen, bei deren Betrieb hohe Beschleunigungen auftreten, wie z. B. in Umformpressen oder Gesenkschmiedewerken.

Typische Vibrations- und Schock- belastbarkeit

Damit ein Druckmessgerät in Anwendungen mit starken Vibrationen und/oder Schocks sicher betrieben werden kann, muss es diesen Belastungen auch standhalten. Die Vibrationsbelastbarkeit von industriellen Druckmessumformern liegt typischerweise im Bereich der 10- bis 20-fachen Erdbeschleunigung (10 g bis 20 g). Die Schockbelastbarkeit von industriellen Druckmessumformern liegt heute bei mehreren 100 g.

Störaussendung und Störfestigkeit

Elektromagnetische Strahlung

Jedes elektrisch betriebene Gerät sendet potenziell elektromagnetische Strahlung aus. Da eine elektronische Schaltung jedoch durch elektromagnetische Strahlung beeinflusst werden kann, können sich derartige Geräte auch gegenseitig beeinflussen (stören). Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) umfassen sowohl die Störaussendung als auch die Störfestigkeit.

EMV-Probleme treten vermehrt dann auf, wenn sich viele elektronische Geräte auf engem Raum befinden. Wegen der zunehmenden Automatisierung ist dies auch in vielen Anwendungen der elektronischen Druckmesstechnik der Fall. EMV-Probleme nehmen aber auch wegen der steigenden Arbeitsfrequenz und elektrischen Leistung der elektronischen Apparate, Anlagen oder Systeme laufend zu.

Innerhalb der Europäischen Union (EU) werden Schutzanforderungen durch die EMV-Richtlinie und deren Umsetzung in nationale Gesetze vorgegeben, die dazu auf entsprechende europaweit harmonisierte Normen verweisen. In den Normen sind verpflichtende Grenzwerte für die Störfestigkeit und Störausendung festgelegt. Nur Geräte, die nach diesen Normen entwickelt und gefertigt sind, dürfen mit dem CE-Kennzeichen versehen und im europäischen Binnenmarkt in Verkehr gebracht werden.

Bei bestimmten Anwendungen werden von den Betreibern allerdings aus oben genannten Gründen erheblich höhere Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit und insbesondere an die Störfestigkeit gestellt, um den sicheren Betrieb auch unter ungünstigen Bedingungen zu gewährleisten. Diese sind in Werksnormen oder Sonderspezifikationen zusammengefasst und müssen für ein bestimmtes Baumuster individuell geprüft werden.

Explosionsschutz

Bei elektronischen Messgeräten, die in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden, muss durch technische Maßnahmen sichergestellt sein, dass entsprechend der Eingruppierung des Ex-Bereichs keine Zündquelle wirken kann. Es gibt mehrere technische Möglichkeiten, den Explosionsschutz eines elektrischen Geräts zu erreichen. Die entsprechenden Konzepte bezeichnet man als Zündschutzarten. In der elektronischen Messtechnik setzt man am häufigsten auf die auch als Eigensicherheit (Kurzzeichen *i*) bezeichnete Begrenzung der Zündenergie: Dazu werden der Strom und die Spannung der elektrischen Versorgung so begrenzt, dass die Mindestzündenergie und Zündtemperatur eines explosiven Gemischs nicht erreicht werden. Eine andere Zünd-

Gesetzliche Anforderungen

Erhöhte Anforderungen

Zündschutzarten



*Abb. 21:
Im Europäischen
Raum gültiges Sym-
bol für Explosions-
schutz*

schutzart ist die druckfeste Kapselung (Kurzzeichen d) der Messgeräte, bei der alle Komponenten, die eine Zündung auslösen können, in ein Gehäuse eingebaut werden, das dem Explosionsdruck standhält. Die entstehende Zündenergie wird durch Spalte im Gehäuse soweit verringert, dass keine Zündung bzw. Übertragung nach außen möglich ist.

Die Einhaltung der Anforderungen an Einrichtungen und Betriebsmittel obliegt grundsätzlich dem Betreiber einer Anlage oder Einrichtung. Anforderungen an Betriebsmittel, von denen eine Zündgefahr ausgehen kann, sind europaweit harmonisiert worden. Sie sind in der ATEX-Produktrichtlinie 94/9/EG aufgeführt. Diese Richtlinie beschreibt das Konformitätsbewertungsverfahren für elektrische und nichtelektrische Geräte, die in explosionsgefährdeten Bereichen eingesetzt werden können. Der Hersteller kann bzw. muss entsprechend dem Konformitätsbewertungsverfahren eine EG-Baumusterprüfbescheinigung erwirken und dies entsprechend am Gerät kennzeichnen (Abb. 21). Im Rahmen seines Qualitätssystems ist der Hersteller dann dafür verantwortlich, dass jedes einzelne Gerät gemäß dieser Baumusterprüfbescheinigung gefertigt wurde.

Typische Anwendungen und Anforderungen

Elektronische Druckmessgeräte übernehmen im industriellen Umfeld zahlreiche Aufgaben. Unter anderem helfen sie bei der Gewinnung von sauberem Trinkwasser in Brunnen oder Meerwasserentsalzungsanlagen, bei der sicheren Steuerung der Landeklappen von Flugzeugen, beim sparsamen Betrieb von Kälte- und Klimageräten, bei der Produktion von Hochleistungsmaterialien in der chemischen Industrie, bei der umweltfreundlichen Erzeugung von Strom in Brennstoffzellen und bei der effizienten Steuerung von Wärmepumpen. Sie gewährleisten den sicheren Betrieb von Kränen und Aufzügen, den reibungslosen Betriebsablauf in Werkzeugmaschinen und Automaten, die umweltschonende Verbrennung in Motoren und den ruhigen und energiesparenden Lauf von Aggregaten und Antrieben.

Trotz dieser Vielfalt lassen sich die Anwendungen der elektronischen Druckmesstechnik grundsätzlich einem von drei Bereichen zuordnen: dem Überwachen kritischer Systemdrücke, dem Regeln von Drücken oder dem indirekten Messen von Prozessgrößen. Die nachfolgende Beschreibung typischer Anwendungen aus allen drei Bereichen gibt einen Überblick über die an elektronische Druckmessgeräte gestellten Anforderungen.

Grenzwertüberwachung

Bei Anwendungen aus dem Bereich der Grenzwertüberwachung hat das Druckmessgerät die Aufgabe zu signalisieren, dass ein bestimmtes

**Zukunfts-
weisende
Anwendungen**

**Drei Anwen-
dungsbereiche**

Leckage- erkennung

kritisches Druckniveau unter- oder überschritten wird. Für die reine Überwachung eignen sich Druckschalter am besten. Ein Druckmessumformer ermöglicht es darüber hinaus, den Systemdruck kontinuierlich zu messen.

Als Beispiel sei die Erkennung von Leckagen in Systemen mit erhöhtem Druck genannt: Tritt in einem solchen System ein Leck auf, sinkt der Systemdruck. Sobald der vorgegebene Grenzwert unterschritten wird, signalisiert dies der elektronische Druckschalter oder Druckmessumformer. Um Leckagen möglichst sicher und frühzeitig zu erkennen, ist meist eine hohe Messgenauigkeit erforderlich.

Abb. 22:
Filterüberwachung



Ein anderes Beispiel ist die Überwachung des Verstopfungsgrads von Filtern (Abb. 22). Mit zunehmendem Verstopfungsgrad ändern sich die Druckverhältnisse vor und hinter dem Filter. Wird vor oder hinter dem Filter ein elektronisches Druckmessgerät angebracht, kann es deshalb Verstopfungen des Filters signalisieren oder den optimalen Zeitpunkt des Filterwechsels anzeigen.

Druckregelung

Bei der Druckregelung mit einem elektronischen Druckmessgerät ist prinzipiell zu unterscheiden, ob ein konstanter Druck oder ein Druckverlauf geregelt werden soll.

Regelung eines konstanten Drucks

Beim Fördern von Medien mit Pumpen ist es oft sinnvoll, den Förderdruck konstant zu halten. Dies lässt sich mit einem elektronischen Druckmessgerät und einem elektronischen Regler erreichen. Das Druckmessgerät sendet den gemessenen Druckwert an den Regler. Dieser prüft, ob und wie stark der aktuelle Druck (Istwert) vom Solldruck (Sollwert) abweicht, und signalisiert dies der Pumpensteuerung. Entsprechend der Druckabweichung passt diese die Antriebsleistung so an, dass sich der Istwert wieder dem Sollwert annähert. Eine solche Regelung bietet nicht nur effektive Kontrolle über den Prozess, sondern ermöglicht auch einen energieeffizienten Betrieb, denn die Antriebsleistung der Pumpe wird permanent an den tatsächlichen Bedarf angepasst.

Regelung eines bestimmten Druckverlaufs

Auch das Abfahren eines bestimmten Druckprofils kann mit Hilfe eines elektronischen Druckmessgeräts und einer elektronischen Regelung sichergestellt, überwacht und, falls notwendig, auch dokumentiert werden. Ein typisches Beispiel ist die Autofrettage, bei der z. B. Rohrleitungen mit dem Vielfachen ihres zulässigen Betriebsdrucks beaufschlagt werden. Diese gezielte Überbelastung bewirkt eine teilweise Plastifizierung und damit eine gezielte Verdichtung des Leitungsmaterials, in deren Folge die Rohrleitungen Druckspitzen besser standhalten. Bei dieser Anwendung muss der Druckverlauf genau geregelt und das Errei-

Autofrettage

chen vorgegebener Druckwerte sicher dokumentiert werden. Weil sehr hohe Drücke bis zu mehreren tausend Bar genau und mit gleich bleibender Genauigkeit wiederholt zu messen sind, werden besonders hohe Anforderungen an die in solchen Applikationen eingesetzten Druckmessgeräte gestellt.

Indirekte Messung von Prozessgrößen

Indirekte Kraftmessung

Gemäß Gleichung 1 (s. S. 6) kann bei bekannter Geometrie aus einem gemessenen Druck auf die den Druck verursachende Kraft geschlossen werden, so z. B. in der in Abbildung 23 gezeigten Hebehydraulik mit zwei beweglichen Kolben mit unterschiedlichen Flächen, die mit Hydrauliköl in Kontakt sind. Wird der kleinere Kolben mit der Kraft F_1 abwärts bewegt, schiebt der größere Kolben mit der

Hebehydraulik

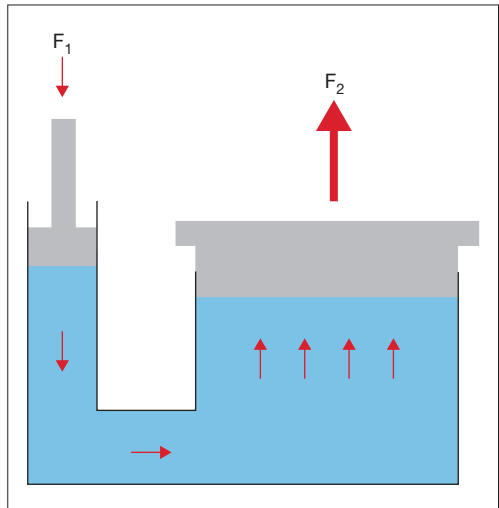


Abb. 23:
Hydraulisches
Prinzip

größeren Kraft F_2 nach oben, denn der Druck in der Flüssigkeit bleibt konstant.

Eine der klassischen Druckmessaufgaben an hydraulischen Systemen ist die Überlastüberwachung an Hebezeugen, Spannvorrichtungen oder Werkzeugen. Nimmt z. B. ein Kran eine Last auf, steigt der für die Erzeugung der Gegenkraft notwendige Druck in der hydraulischen Flüssigkeit an. Wird die maximal zulässige Last überschritten, übersteigt als Folge auch der Druck den eingestellten oberen Grenzwert. So lässt sich auf der Basis des gemessenen Drucks in der Hydraulikflüssigkeit eine Lastmomentbegrenzung erreichen.

Viele Hydraulikanwendungen sind in der Mobilhydraulik (Abb. 24), also z. B. in Baumaschinen, landwirtschaftlichen Fahrzeugen, Hebebühnen oder Staplern anzutreffen. In solchen Anwendungen eingesetzte Druckmessgeräte müssen betriebsbedingt häufig besonders hohe Schock- und Vibrationsbelastungen ertragen und über eine besonders hohe elektromagneti-

Überlastüberwachung

*Abb. 24:
Druckmessgeräte in der Mobilhydraulik müssen harte Einsatzbedingungen ertragen.*



Regelung einer hydraulischen Presse

sche Störfestigkeit verfügen. Darüber hinaus müssen sie im Außeneinsatz extremen Klimabedingungen standhalten. Weil derartige Maschinen oft mit Dampfstrahlern gereinigt werden, müssen sie auch unter hohem Strahldruck von allen Seiten dicht sein. Zudem müssen sie nicht nur gegenüber Hydraulikölen, sondern auch gegenüber vielen anderen Medien wie Staub, Schlamm und Kraftstoffen beständig sein.

Besonders hohe Anforderungen stellt die Regelung einer hydraulischen Presse durch indirekte Kraftmessung in der Hydraulik. Bei jedem Pressvorgang muss ein genau vorgegebenes Kraftprofil abgefahren werden. Mit Hilfe eines elektronischen Druckmessgeräts kann dieses Profil überwacht und geregelt werden.

Indirekte Füllstandsmessung

Der hydrostatische Druck unter einer ruhenden Flüssigkeitssäule nimmt proportional zur Höhe der Säule zu. So ist z. B. der Druck in einem Wassertank mit jedem Meter Wassertiefe um 100 mbar höher als der an der Wasseroberfläche wirksame Luftdruck (Abb. 25).

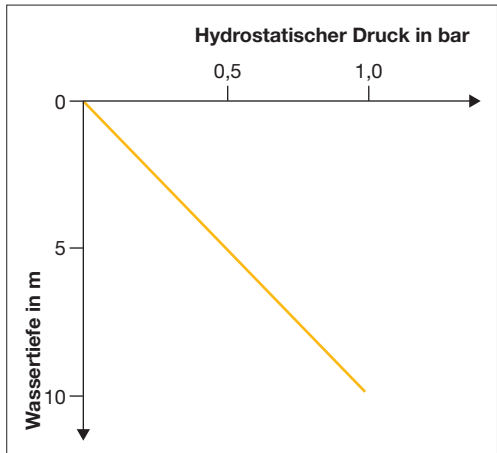
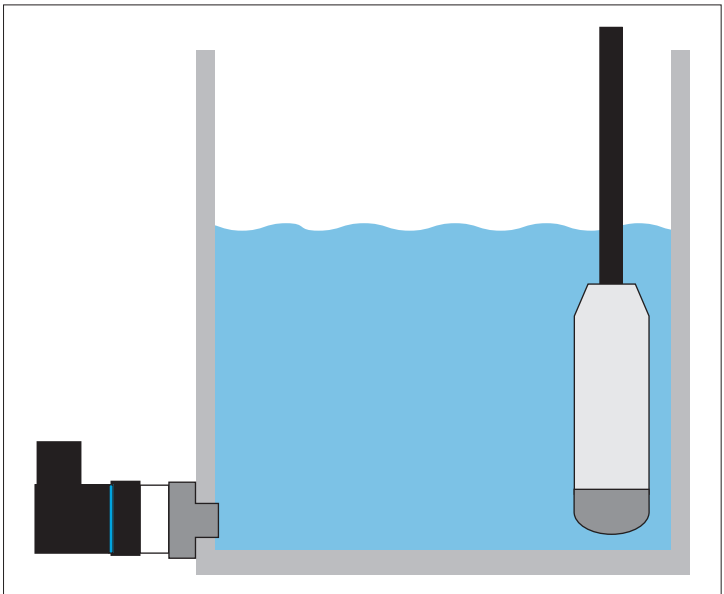


Abb. 25:
Funktionaler
Zusammenhang
zwischen Wasser-
druck und -tiefe

Elektronische Druckmessgeräte werden zur indirekten Füllstandsmessung eingesetzt, wenn der Füllstand eines Tanks überwacht werden muss, weil der Tank z. B. nicht vollständig entleert werden darf oder der Verbrauch des Tankinhalts kontinuierlich erfasst werden soll. Je nach Anwendung wird entweder eine Pegelsonde in den Tank getaucht oder ein Druckmessgerät von außen am Tankboden angebracht und durch eine Öffnung im Tankboden mit dem Tankinhalt beaufschlagt (Abb. 26). Ist der Tank nicht belüftet oder steht er unter erhöhtem Druck, muss der oberhalb der Flüssigkeit herrschende Druck im Tank gemessen und bei der Ermittlung des hydrostatischen Drucks berücksichtigt werden. Dies kann sowohl durch den Einsatz zweier unabhängiger Druckmessgeräte und anschließender Druckdifferenzbildung in der nachgeschalteten Steuerung

*Abb. 26:
Möglichkeiten der
Füllstandsmessung
an einem Tank*



Automatisiertes Füllen eines Tanks

oder durch spezielle, für diese Anwendung konstruierte Differenzdruckmessgeräte mit zwei Prozessanschlüssen geschehen.

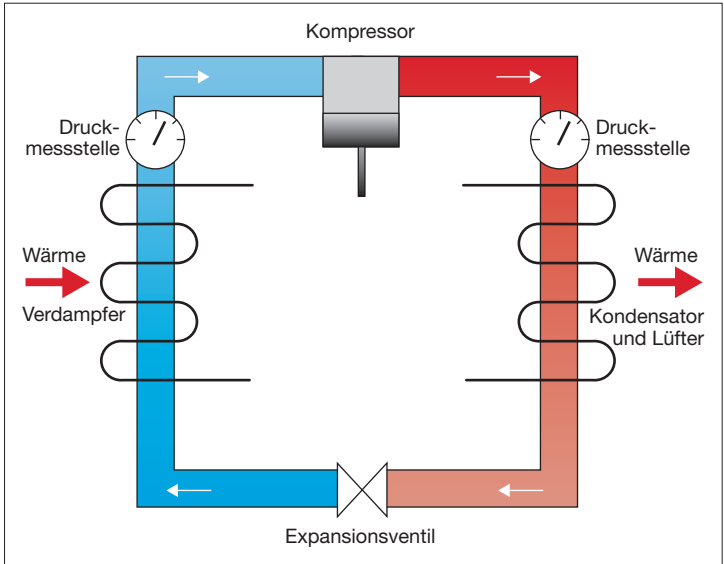
Mit Hilfe eines elektronischen Druckschalters kann auch das (Nach-) Füllen eines Tanks automatisiert werden. Dazu sind die Zustände »Tank ist leer« und »Tank ist voll« zu definieren und die Förderpumpe über die Schaltkontakte entsprechend des signalisierten Zustands ein- bzw. auszuschalten. Die kontinuierliche Füllstandsüberwachung über einen integrierten Analogausgang oder auch über die Digitalanzeige des elektronischen Druckschalters ist ein sinnvoller Zusatznutzen.

Elektronische Druckmessgeräte für die Füllstandsmessung zeichnen sich vor allem durch ihre Medienbeständigkeit und häufig relativ kleinen Messbereiche aus. Bei der Pegelsonde kommt aufgrund des dauerhaften Untertauchens hinzu, dass das Medium weder in das Kabel noch in die Sonde eindringen darf – selbst dann nicht, wenn die Tauchtiefe einige hundert Meter beträgt. In explosionsgefährdeten Anwendungen wie in Bohrlöchern der Erdöl- und Erdgasexploration oder in Raffinerien und Anlagen der chemischen Industrie muss das Messgerät darüber hinaus der geforderten Zündschutzart entsprechen. Für die Anwendung in Brunnen, Schächten und Bohrlöchern ist eine möglichst schlanke Bauform erforderlich und es bestehen hohe Anforderungen an die Robustheit des (meist sehr langen) Kabels.

Pegelsonden für spezielle Anwendungen

Indirekte Temperaturmessung

In Klima- und Kälteanlagen oder Wärmepumpen werden Druckmessungen zur indirekten Messung und zur Regelung der Temperatur herangezogen. So sorgen sie z. B. dafür, dass Lebensmittel im Kühlregal oder Gefrierschrank energiesparend kühl bleiben.



Im Verdampfer eines Kältemittelkreislaufs (Abb. 27) nimmt das kalte und flüssige Kältemittel Wärme aus der zu kühlenden Umgebung auf. Während des Verdampfens entzieht es der Umgebung zusätzlich Wärme: die Verdampfungsenthalpie. Dieser Phasenübergang lässt sich durch gezieltes Entspannen des unter Druck stehenden Kältemittels im Expansionsventil sehr feinfühlig steuern. Über den gemessenen und geregelten Druck lässt sich deshalb die erzielte Kühlwirkung sehr exakt regeln. Das verdampfte und erwärmte Kältemittel wird mit einem Kompressor wieder verdichtet, wodurch sein Druck und seine Temperatur steigen. Mit Druckmessumformern können der Druck im Kältemittelkreislauf genau erfasst und das Expansionsventil und der Kompressor gezielt gesteuert werden. Der gemessene Druck erlaubt auch Rückschlüsse auf den Aggregatzustand des Kältemittels. Weil flüssiges

Abb. 27:
Kältemittelkreislauf

Sicherheitsfunktion

Kältemittel den Kompressor beschädigen würde, muss sichergestellt werden, dass es vor der Verdichtung noch gasförmig ist. Hier übernimmt die Druckmessung zusätzlich eine wichtige Sicherheitsfunktion. Im Kondensator angelangt, gibt das heiße und komprimierte Kältemittel Wärme an die Umgebung ab und verflüssigt dadurch wieder. Bei großen Kälteanlagen beschleunigen Lüfter die Kondensation. Wird im Kondensator der Druck und dadurch indirekt die Temperatur gemessen, kann die Leistung der Lüfter genau an den jeweiligen Bedarf angepasst werden. Diese bedarfsorientierte Lüfterregelung führt zu erheblichen Energieeinsparungen. Der Einsatz von Druckmessumformern im Kältemittelkreislauf ermöglicht also sowohl eine bessere Kontrolle des Prozesses als auch erhebliche Energieeinsparungen.

Prozesskontrolle und Energieeinsparung

Die verwendeten Messgeräte sollten zum einen beständig gegenüber allen gängigen Kältemitteln sein, zum anderen müssen sie trotz der außergewöhnlichen Temperaturbedingungen – vor dem Kompressor können Temperaturen bis zu -40 °C , hinter dem Kompressor bis zu $+100\text{ °C}$ herrschen – mit sehr hoher Genauigkeit messen, um die Entspannung des Kältemittels im Verdampfer präzise steuern zu können. Mit dem Einsatz neuer Kältemittel können die Anforderungen hinsichtlich der Einsatztemperaturen und des Druckbereichs in der Zukunft allerdings noch erheblich steigen.

Kriterien für die Geräteauswahl

Abgesehen von Sonderbauformen und Modellen, die auf ganz spezielle Einsatzfälle optimal abgestimmt sind, werden Druckmessgeräte in der Regel in zahlreichen Varianten angeboten, die sich insbesondere im Messbereich, Druckanschluss, elektrischen Anschluss, Ausgangssignal und in der Messgenauigkeit unterscheiden. Die Auswahl eines für eine spezielle Anwendung geeigneten Druckmessgeräts ist daher ein komplexer Vorgang. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die wesentlichen Spezifikationen eines Druckmessgeräts.

Messbereich

Der im Datenblatt ausgewiesene Messbereich eines Drucksensors legt fest, innerhalb welcher Grenzen der Druck gemessen oder überwacht werden kann. Wichtig bei der Angabe des Messbereichs sind der Messbereichsanfang, das Messbereichsende (Abb. 28) und die Druckmessgröße, also ob es sich um Absolut- oder Relativdruck handelt. Innerhalb des Messbereichs gelten die ebenfalls im Datenblatt spezifizierten Genauigkeitsangaben.

Im Datenblatt spezifizierte Druckbereiche, die sich unter- und oberhalb des Messbereichs anschließen, werden als Überlastbereiche bezeichnet. Drücke im Überlastbereich hinterlassen zwar keine bleibenden Schäden am Sensor, allerdings können die im Datenblatt spezifizierten Fehlergrenzen überschritten werden. Erst Drücke oberhalb der Überlastgrenze, im so genannten Zerstörbereich, können zu irreversiblen Schäden am Messgerät führen. Dabei ist es unerheblich, ob der Druck dauerhaft oder nur

Angrenzende Druckbereiche

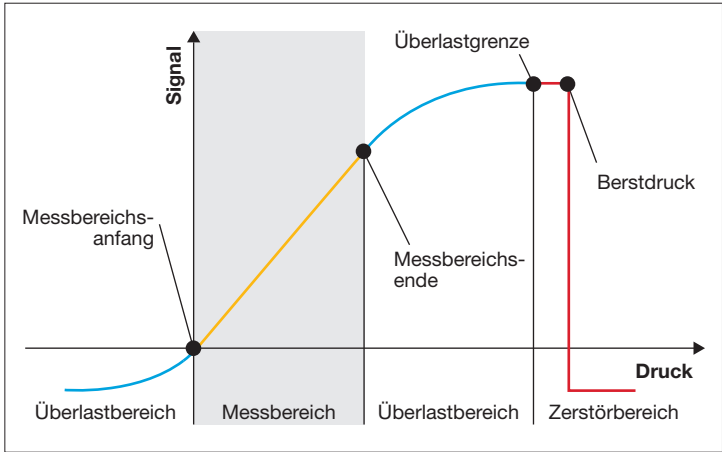


Abb. 28:
Messbereich, Überlastbereiche und Zerstörungsbereich

Druckspitzen

kurzzeitig anliegt. Ab dem spezifizierten Berstdruck muss mit der vollständigen Zerstörung der druckbeaufschlagten Teile und dem plötzlichen Austritt des Druckmediums gerechnet werden. Diese Betriebsbedingungen sind deshalb durch sorgfältige Auslegung unbedingt zu vermeiden.

Besondere Vorsicht ist bei Druckspitzen, d. h. dynamischen Druckanteilen geboten. Sie werden z. B. durch das Ein- oder Ausschalten einer Pumpe, das Zu- oder Abschalten eines Hydrauliksystems und insbesondere durch das Öffnen oder Schließen von schnell schaltenden Ventilen in Flüssigkeitsströmungen verursacht. Die Druckstöße können ein Vielfaches des Betriebsdrucks betragen. Im Haushalt tritt dieser Effekt mitunter beim schnellen Schließen von Wasserhähnen auf. Er wird deshalb auch in der Technik als Wasserschlag (engl. *water hammer*) bezeichnet. Die entstehende Druckwelle pflanzt sich im gesamten System fort und führt teilweise zu extrem hohen Belastungen und nicht selten zur Überlastung von Sensoren. Druckspitzen im Zer-

störbereich können sogar zum Bersten des Sensorelements führen. Sie stellen deshalb ein Sicherheitsrisiko dar und sind bei der Anlagenauslegung unbedingt zu berücksichtigen. Gängige Methoden, um Druckspitzen zu mindern, sind Drosseln im Druckkanal und Erodierbohrungen. Derartige Verengungen verhindern die ungehemmte Fortpflanzung einer Druckwelle, indem sie sie zu einem großen Teil reflektieren.

Extrem hohe Druckspitzen können durch Kavitation und den Mikrodieseleffekt hervorgerufen werden. Als Kavitation bezeichnet man allgemein das Entstehen und implosionsartige Auflösen von Hohlräumen in Flüssigkeiten durch Druckschwankungen. Die entstehenden kurzzeitigen Druck- und Temperaturspitzen können sogar zum Materialabtrag an metallenen Bauteilen führen. Bilden sich z. B. in einer Hydraulikflüssigkeit durch Kavitation kleine Bläschen aus einem brennbaren Luft-Kohlenwasserstoff-Gemisch, das beim Druckaufbau durch lokale Selbstentzündung verbrennt, spricht man vom Mikrodieseleffekt. Falls nicht besondere Maßnahmen getroffen werden, kann die aus der Mikroexplosion resultierende Druckwelle zu erheblichen Druckspitzen im hydraulischen System und in deren Folge zur Zerstörung von Bauteilen führen. Wegen der prinzipbedingten und gewünschten Empfindlichkeit der Drucksensorik müssen entweder diese beiden Effekte wirksam verhindert oder die Sensoren vor den Auswirkungen dieser Effekte geeignet geschützt werden. Elektronische Druckmessgeräte, die speziell für gefährdete Anwendungen konstruiert sind, verfügen deshalb meist von vornherein über Schutzmechanismen wie z. B. die bereits genannten Erodierbohrungen, speziell gestaltete Drosselemente oder besonders ausgeführte Prall- und Umlenkplatten im Druckkanal.

Schutz vor Kavitation und Mikrodieseleffekt

Druckanschluss

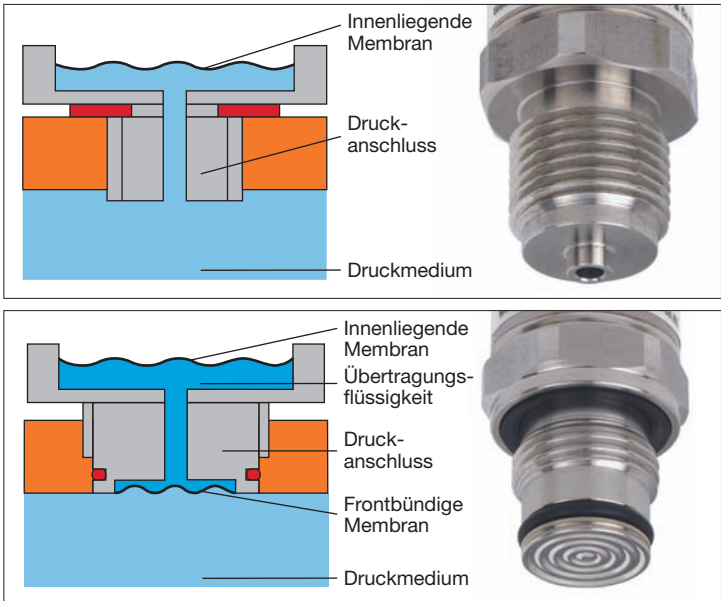
Über den häufig auch als Prozessanschluss bezeichneten Druckanschluss wird das Druckmedium auf den Sensor geleitet. Nahezu alle Druckanschlüsse verfügen über ein Normgewinde und können deshalb problemlos an der Messstelle eingeschraubt werden.

Führende Hersteller bieten häufig eine Vielzahl von Druckanschlüssen für ihre Druckmessgeräte an, um den unterschiedlichen Anforderungen verschiedener Branchen und Anwendungen sowie regionalen und nationalen Standards gerecht zu werden.

Innenliegende oder frontbündige Membran

Zu unterscheiden ist zwischen Druckanschlüssen mit innenliegender und solchen mit frontbündiger Membran. Bei Ersteren gelangt das

Abb. 29:
Innenliegende (oben)
und frontbündige
Membran (unten)



Druckmedium über eine Kanalbohrung bis zur Sensormembran (Abb. 29 oben). Bei Letzteren wird der Druckkanal durch eine zusätzliche Edelstahlmembran frontbündig verschlossen, und eine Übertragungsflüssigkeit im Inneren des Sensors überträgt den Druck bis zur innenliegenden Sensormembran (Abb. 29 unten).

Druckanschlüsse mit innenliegender Membran und Kanalbohrung sind einfacher zu handhaben und kostengünstiger zu fertigen als solche mit frontbündiger Membran. Sie werden vor allem bei gasförmigen und flüssigen Druckmedien eingesetzt. Bei allen Druckmedien, die den Kanal verstopfen oder beschädigen könnten, wie z. B. bei kristallinen, viskosen, aggressiven, haftenden oder abrasiven Medien, ist es ratsam, eine frontbündige Membran einzusetzen. Auch wenn die Anwendung eine rückstandsfreie Reinigung des Druckanschlusses verlangt, ist die frontbündige Membran der innenliegenden vorzuziehen.

Auswahlkriterien

Gewinde

Um das Messgerät an der Messstelle einschrauben und zugleich abdichten zu können, sind Druckanschlüsse typischerweise mit einem Gewinde versehen. Weltweit betrachtet sind verschiedene Gewinde verbreitet (Tab. 3). Üblich sind generell sowohl Innen- als auch Außengewinde.

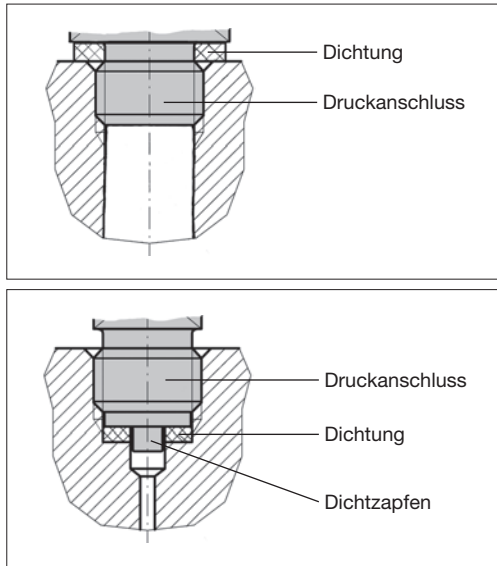
Tab. 3:
Gewinde im
Überblick

Gewinde	Kurzzeichen	Region/Land
Zylindrische Rohrgewinde	G	Westeuropa
Selbstdichtende Rohrgewinde	NPT	Nordamerika
Feingewinde	UNF	Nordamerika
Metrische Gewinde	M	Osteuropa und Russland
Kegelförmige Whitworth-Rohrgewinde	R oder PT	Asien

Abdichtung

So vielfältig wie die Gewinde sind auch die Abdichtungskonzepte. Einige Gewinde sind selbstdichtend, wie z. B. kegelige Gewinde. Andere Gewinde benötigen hingegen eine zusätzliche Dichtung. Dafür gibt es unterschiedliche branchenspezifische und regionale Lösungen. Am weitesten verbreitet bei zylindrischen Gewinden ist zum einen die Abdichtung hinter dem Gewinde, also zwischen dem Gewinde und dem Gehäuse, und zum anderen die Abdichtung vor dem Gewinde mit einem metallenen Dichtzapfen (Abb. 30).

Abb. 30:
Abdichtung zwischen
Gewinde und
Gehäuse (oben);
Abdichtung mit
metallenem Dicht-
zapfen (unten)



Elektrischer Anschluss

Stecker oder Kabel

Der elektrische Anschluss eines elektronischen Druckmessgeräts erfolgt entweder über einen standardisierten Stecker oder über einen Kabelausgang (Abb. 31). Die Art des Anschlusses



*Abb. 31:
Verschiedene elek-
trische Anschlüsse*

bestimmt ganz wesentlich die IP-Schutzart des Geräts (s. S. 34 f.) und schränkt auch häufig den zulässigen Umgebungstemperaturbereich und die Beständigkeit des Geräts gegen aggressive Medien oder Umgebungseinflüsse (z.B. UV-Strahlung) ein. Um die Zuverlässigkeit der elektrischen Verbindung in der Anwendung sicherzustellen, müssen daher die spezifischen Einbaubedingungen genauestens bekannt sein und bei der Auswahl des elektrischen Anschlusses berücksichtigt werden. Bei Stecker-Systemen ist vor allem zu beachten, dass der (vom Anwender gewählte) Gegenstecker mit- samt der zugehörigen Kabeleinführung integraler Bestandteil des Dichtsystems für das Geräte- gehäuse wird.

Zuverlässigkeit

Ausgangssignale

Das Ausgangssignal eines elektronischen Druckmessgeräts ist meist ein analoges Spannungs- oder Stromsignal. Es wird an eine dem Gerät nachgeschaltete Steuer- oder Regelinheit weitergeleitet. Es werden aber auch Druckmessgeräte mit digitalem Ausgang angeboten. Mit Ausnahme des Schaltausgangs-

Analog oder digital

signals, das streng genommen bereits ein digitales Signal ist, sollte das Ausgangssignal möglichst proportional zum Druck sein.

Dazu muss zuerst der Sensor (Druckaufnehmer) ein messbares und druckproportionales Sensorsignal generieren. Zu diesem Zweck sind die Widerstände in Messgeräten mit Dehnungsmessstreifen auf dem Sensor zu einer Wheatstone'schen Messbrücke verschaltet. In Druckmessumformern, Drucktransmittern und Druckschaltern mit analogem Ausgangssignal werden die sehr kleinen Sensorsignale mit Hilfe von elektronischen Bauteilen verstärkt, gefiltert und normiert. Das Ergebnis ist ein Standard-Industriesignal, das als Ausgangssignal verwendet wird. Die wichtigsten Ausgangssignale sind im Folgenden kurz dargestellt.

Standard-Industriesignale

Analoges (Standard-)Ausgangssignal

Das gängigste Ausgangssignal in der Druckmesstechnik ist das analoge Ausgangssignal. Üblich sind das Stromsignal 4...20 mA und die Spannungssignale 0...5 V, 0...10 V sowie 1...5 V. Die Vorteile von Stromsignalen sind die im Vergleich zu Spannungssignalen wesentlich geringere Empfindlichkeit gegenüber elektromagnetisch bedingten Störungen und der prinzipbedingte automatische Ausgleich des Leitungsverlusts durch die Stromschleife. Ein angehobener Nullpunkt wie beim Stromsignal 4...20 mA und beim Spannungssignal 1...5 V ermöglicht zusätzlich die Erkennung von Kabelbrüchen und Gerätefehlern.

4...20 mA

Das Ausgangssignal 4...20 mA wird häufig mit Zweileitertechnik übertragen, bei der sich der Sensor direkt aus der Energie der Stromschleife mit Hilfsenergie versorgt. Die anderen analogen Signale benötigen eine Dreileiterverbindung, bei der das Gerät über den dritten Leiter mit Hilfsenergie versorgt wird.

Ratiometrische Ausgangssignale

Am leichtesten zu generieren sind zur Versorgungsspannung proportionale analoge Ausgangssignale, bei denen der Nullpunkt und der Endwert einen festen Prozentsatz der Sensorversorgungsspannung darstellen. So beträgt z. B. beim 10-90-Signal der Nullpunkt 10 % der Versorgungsspannung, der Endwert 90 %. Sinkt die Versorgungsspannung um 5 %, sinkt auch das absolute Ausgangssignal um 5 %. Das Verhältnis (lat. *ratio*) von Ausgangssignal zu Versorgungsspannung bleibt aber unverändert.

Oft werden Sensoren mit einer (reduzierten) Versorgungsspannung von 5 V betrieben. Das 10-90-Signal wird dann in vielen Datenblättern als »0,5...4,5 V ratiometrisch« ausgewiesen. Es handelt sich um das bekannteste ratiometrische Ausgangssignal.

**0,5...4,5 V
ratiometrisch**

Digitales Ausgangssignal

Grundsätzlich bietet die Übertragung von digitalen Ausgangssignalen über Feldbussysteme die Möglichkeit, mit dem Druckmessgerät zu kommunizieren, um Betriebsdaten oder Parameter auszutauschen. Beides ist in der industriellen Druckmesstechnik allerdings nur von untergeordneter Bedeutung. Deshalb spielen elektronische Druckmessgeräte mit einer Anbindung an den CAN-Bus oder PROFIBUS-DP in der industriellen Anwendung derzeit kaum eine Rolle. Auch die dem analogen Ausgangssignal aufmodulierte digitale Kommunikation, wie z. B. durch HART auf dem Standardsignal 4...20 mA, setzt sich bei Druckmessgeräten bisher nur in bestimmten Nischen durch. Als Gründe sind vor allem die häufig deutlich höheren Kosten für das Druckmessgerät und die zugehörige Peripherie sowie die wegen der zusätzlichen Steuerungssoftware aufwendigere Einbindung der Geräte bei (relativ) geringem

**Busfähiges
Signal**

Mehrnutzen. Da grundsätzlich eine zusätzliche Buskonfiguration des Druckmessgeräts notwendig ist und die Diagnose einer gestörten digitalen Verbindung deutlich aufwendiger ist als bei einer analogen Verbindung, wiegen die Vorteile der potenziell genaueren Messwertübertragung in vielen Anwendungen die Mehrkosten nicht auf.

Kennlinie, Genauigkeit und Messfehler

Die Kennlinie eines Messgeräts spiegelt die funktionale Abhängigkeit des Ausgangssignals vom Eingangssignal wider. Idealerweise ändert sich das Ausgangssignal eines elektronischen Druckmessgeräts linear mit dem Druck. Die ideale Kennlinie ist daher eine Gerade. Die gemessene, d.h. reale Kennlinie ist aber nicht exakt linear, selbst am Anfangs- und Endpunkt des Druckbereichs können die Ausgangssignale von den jeweiligen idealen Werten abweichen (Abb. 32).

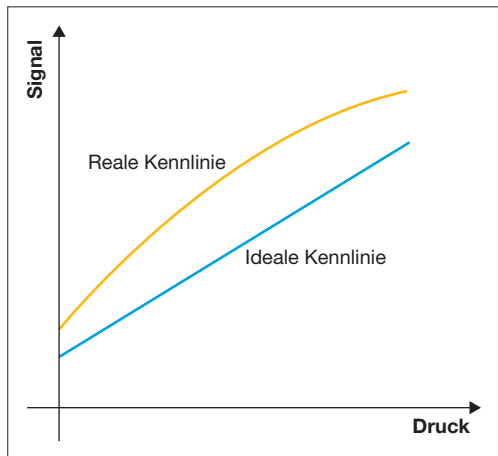


Abb. 32:
Ideale und reale
Kennlinie

Die Abweichung der realen von der idealen Kennlinie wird oft als »Genauigkeit« bezeichnet. Dieser Begriff wird jedoch in keiner Norm definiert. Zur Bestimmung von Messfehlern werden stattdessen andere Größen herangezogen. Messfehler werden in der Regel in Prozent der Spanne angegeben. Als Spanne bezeichnet man die Differenz zwischen dem End- und Anfangswert des Ausgangssignals: Bei dem Standardausgangssignal 4...20 mA beträgt sie demnach 16 mA.

Genauigkeit

Spanne

Maximale Messabweichung

Die gelegentlich auch als Richtigkeit bezeichnete Messabweichung beinhaltet alle relevanten Fehler bei einer festen Temperatur (z.B. Referenztemperatur), wie die Nichtlinearität, die Hysterese sowie den Nullpunkt- und Spannefehler. Sie lässt sich aus der Kennlinie unmittelbar ablesen. Wird das Druckmessgerät bei dieser Temperatur betrieben, handelt es sich bei der maximalen Messabweichung um den maximalen Fehler, mit dem der Druck erfasst wird (Abb. 33).

Messfehler bei Referenztemperatur

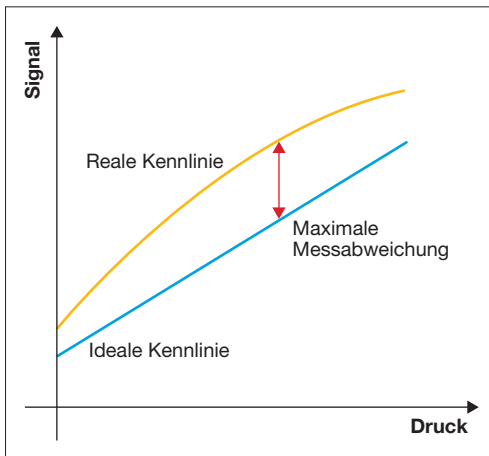


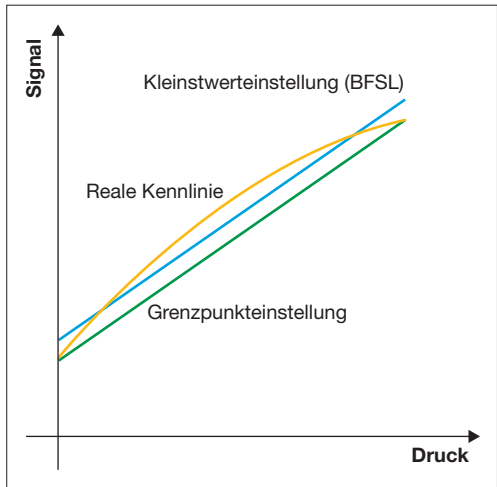
Abb. 33: Messabweichung bei einer bestimmten Temperatur

Bestimmung der Referenzgeraden

Nichtlinearität

Der als Nichtlinearität bezeichnete Messfehler ist als größtmögliche positive oder negative Abweichung der realen Kennlinie von einer Referenzgeraden definiert. Zur Bestimmung der Referenzgeraden gibt es unterschiedliche Methoden. Die zwei gängigsten sind die Grenzpunkteinstellung und die Kleinstwert-einstellung (Abb. 34). Bei der Grenzpunkteinstel-

Abb. 34:
Ermittlung der Nichtlinearität nach der Grenzpunkt- und Kleinstwert-einstellung



lung verläuft die Referenzgerade durch den Anfangs- und Endpunkt der gemessenen Kennlinie. Bei der Kleinstwert-einstellung wird die Referenzgerade (in den Datenblättern oft als BFSL bezeichnet) so zur gemessenen Kennlinie gelegt, dass die Summe der Quadrate der Abweichungen minimal ist.

BFSL

Vergleicht man beide Methoden miteinander, liefert die Grenzpunkteinstellung typischerweise eine bis zu doppelt so große Abweichung wie die Kleinstwert-einstellung. Ein Vergleich der Nichtlinearität von elektronischen Druckmessgeräten verschiedener Hersteller ist

deshalb nur dann aussagekräftig, wenn die Nichtlinearität jeweils auf Basis der gleichen Methode ermittelt wurde.

Die Nichtlinearität ist eine Grundeigenschaft des eingesetzten Sensorsystems. Sie kann gegebenenfalls mit elektronischen Mitteln durch den Hersteller minimiert werden.

**Elektronisch
minimierbar**

Hysterese

Nimmt man zuerst bei kontinuierlich zunehmendem Druck und dann bei kontinuierlich abnehmendem Druck die Kennlinie eines Messgeräts auf, ist festzustellen, dass die Ausgangssignale für identische Drücke nicht exakt übereinstimmen. Die maximale Abweichung zwischen steigender und fallender Kennlinie wird als Hysterese bezeichnet (Abb. 35).

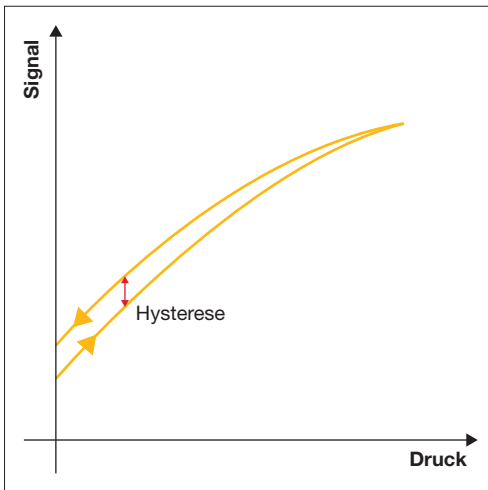


Abb. 35:
Hysterese

Die Hysterese hängt mit den elastischen Eigenschaften des Sensormaterials und dem Konstruktionsprinzip des Sensors zusammen. Sie lässt sich mit technischen Mitteln (z. B. durch einen Abgleich) nicht kompensieren.

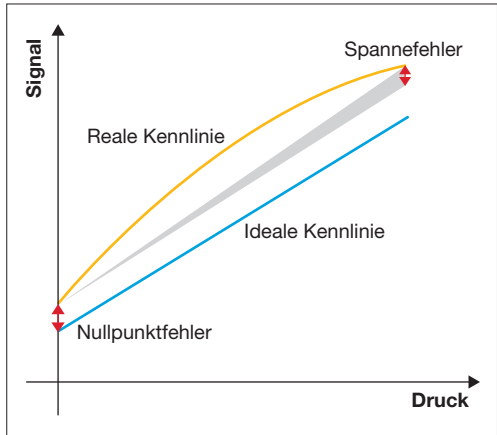
**Nicht technisch
kompensierbar**

Zwei unabhängige Fehler

Abb. 36:
Nullpunkt- und
Spannefehler

Nullpunkt- und Spannefehler

Der reale Null- und Endpunkt des Ausgangssignals kann vom idealen Null- und Endpunkt abweichen. Als Nullpunkt- und Spannefehler bezeichnet man die betragsmäßigen Differenzen zwischen den idealen und den tatsächlichen Werten des (evtl. angehobenen) Nullpunkts und



des Endpunkts des Ausgangssignals. Spannefehler und Nullpunktfehler sind bei der Beurteilung der Richtigkeit einer Messung immer unabhängig voneinander zu berücksichtigen (Abb. 36). Im Extremfall können beide Fehler in einem einzelnen Druckmessgerät zufällig das gleiche Vorzeichen und den maximal erlaubten Betrag annehmen.

Nichtwiederholbarkeit

Wie andere technische Systeme auch unterliegen elektronische Druckmessgeräte stochastischen, d.h. zufallsbedingten Einflüssen. Deshalb ist das Ausgangssignal für gleiche Druckwerte bei aufeinander folgenden Messungen nicht immer exakt gleich, auch wenn unter identischen Bedingungen gemessen wird.

Der als Nichtwiederholbarkeit bezeichnete Messfehler entspricht der größten Abweichung aus drei aufeinander folgenden Druckmessungen unter identischen Bedingungen und damit dem Betrag nach der Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten gemessenen Ausgangssignal. Somit bildet eine geringe Nichtwiederholbarkeit die Grundlage jedes zuverlässigen Sensorsystems mit definierter Genauigkeit.

Definition**Temperaturfehler**

Jede Veränderung der Temperatur beeinflusst unmittelbar die messrelevanten Eigenschaften eines elektronischen Druckmessgeräts. So nimmt mit zunehmender Temperatur der elektrische Widerstand von Metallen zu und der von Halbleitern für piezoresistive Widerstände ab. Die meisten Materialien dehnen sich bei Erwärmung aus. Diese und andere Effekte tragen dazu bei, dass Temperaturänderungen unweigerlich zu Messfehlern führen.

Gegen diese Temperaturfehler ergreifen die Hersteller von elektronischen Druckmessgeräten meist eine Reihe von Maßnahmen, die sowohl das Sensorsystem als auch die zugehörige Elektronik betreffen. So wird die Sensor-konstruktion (Materialien und Geometrie) grundsätzlich mit dem Ziel eines möglichst ausgeglichenen Temperaturverhaltens optimiert, um insbesondere Nichtlinearitäten und unstetiges Verhalten zu minimieren. Verbleibende und aufgrund von Resttoleranzen unvermeidbare, aber systematische Temperaturfehler können im Fertigungsprozess oder durch geeignete On-Board-Intelligenz – Stichwort: »Smart Sensor« – weiter reduziert werden.

Die Kompensation temperaturbedingter Fehler während des Fertigungsprozesses erfolgt entweder direkt auf dem Sensor oder/und in der zugehörigen Elektronik. So kann z. B. ein

**Gegen-
maßnahmen****Kompensation
während der
Fertigung**

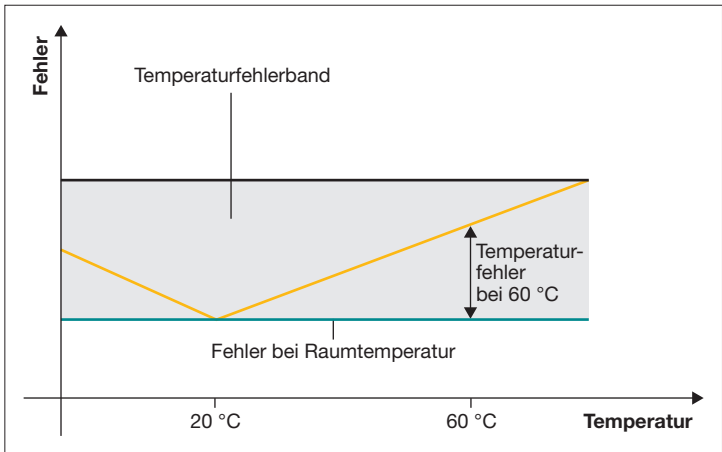
Aktive Temperaturkompensation

Laserabgleich der Messbrücke im Sensor vorgenommen werden. Um während der Fertigung eine Kompensation des Gesamtsystems aus Sensor und Elektronik vorzunehmen, wird die Genauigkeit des Sensormoduls oder sogar des gesamten Druckmessgeräts bei verschiedenen Temperaturen mit Referenzgeräten verglichen (Kalibration) und, falls erforderlich, z. B. durch gezieltes Bestücken mit entsprechenden Kompensationswiderständen oder elektronisch justiert.

Präzisionsmessgeräte verfügen häufig über einen zusätzlichen, im Gehäuse integrierten Temperatursensor und eine entsprechend programmierte Logik, die den Temperaturfehler direkt im Gerät kompensiert. Dieses Verfahren wird deshalb häufig als »aktive Temperaturkompensation« bezeichnet.

Trotz aller Kompensationsmaßnahmen bleibt immer ein kleiner Temperaturfehler. Dieser wird entweder als Temperaturkoeffizient oder als Temperaturfehlerband angegeben. Gibt der Hersteller einen Temperaturkoeffizienten an, wird ein (linearer) Fehler ausgehend von ei-

Abb. 37:
Temperaturkoeffizient und Temperaturfehlerband



nem Bezugspunkt (z. B. Raumtemperatur) angenommen. Dabei ist der Temperaturfehler bei Raumtemperatur am kleinsten und nimmt mit zunehmendem Abstand zur Raumtemperatur mit dem spezifizierten Koeffizienten linear zu (Abb. 37). Erst die Summe aus Nullpunkt- und Spannetemperaturfehler ergibt den maximalen gesamten Temperaturfehler.

Wird der Temperaturfehler alternativ in Form eines Fehlerbands angegeben, bestimmt der maximale Temperaturfehler, der innerhalb des temperaturkompensierten Messbereichs auftritt, die Breite des Fehlerbands.

Langzeitstabilität

Die Kennlinie eines Druckmessgeräts ist prinzipbedingt nicht über die gesamte Lebensdauer konstant, sondern kann sich durch mechanische (Druckwechsel) und vor allem durch thermische Einflüsse mit der Zeit geringfügig verändern. Diese schleichende Veränderung wird als Langzeitstabilität oder auch Langzeitdrift bezeichnet.

In der Regel wird die Langzeitstabilität durch Labortests ermittelt. Weil sich die Testabläufe verschiedener Hersteller deutlich unterscheiden, lassen sich Angaben zur Langzeitstabilität allerdings kaum miteinander vergleichen. Auch legen die Simulationen stets Referenzbedingungen zugrunde. Die tatsächliche Langzeitstabilität unter Einsatzbedingungen kann deshalb von der im Datenblatt angegebenen deutlich abweichen. Trotz der genannten Einschränkungen ihrer Aussagekraft gilt die Langzeitstabilität als wichtiges Maß für die Qualität des Messgeräts.

Genauigkeitsangaben

Genauigkeitsangaben werden statistisch ermittelt, denn Messfehler beinhalten sowohl einen systematischen als auch einen zufälligen An-

Langzeitdrift

Systematischer und zufälliger Anteil

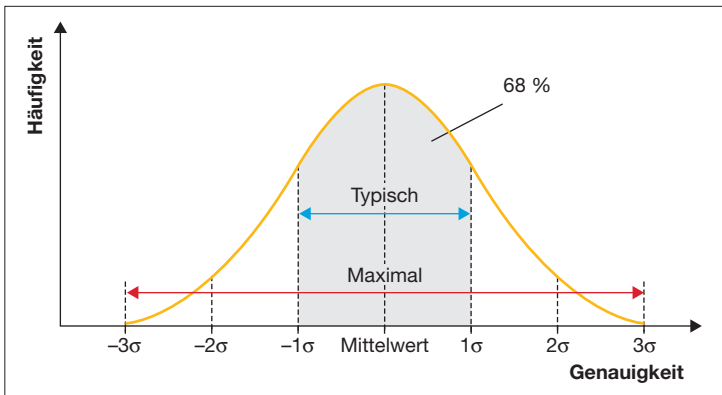
Maximaler und typischer Fehler

teil. Es ist zu unterscheiden, ob ein Messfehler als »maximal« oder »typisch« ausgewiesen ist. Bei einem maximalen Fehler ist davon auszugehen, dass praktisch kein Geräteexemplar einen größeren als den ausgewiesenen Fehler besitzt. Vielmehr besitzt ein Großteil der ausgelieferten Exemplare tatsächlich einen weit aus kleineren Fehler.

Fehlerhäufigkeit

Wird ein elektronisches Druckmessgerät gründlich entwickelt und mit ausreichender Prozesskontrolle solide gefertigt, kann von fast allen Messfehlern angenommen werden, dass die Häufigkeit des Messfehlers der Normalverteilung folgt. Ein »maximaler« Fehler entspricht dann in der Regel dem Erwartungswert des Fehlers plus oder minus dem Dreifachen seiner Standardabweichung (3σ). Das schließt mehr als 99 % aller Exemplare ein (Abb. 38). Ist ein Fehler mit dem Zusatz »typ.« für typisch gekennzeichnet, ist davon auszugehen, dass nicht jedes einzelne Exemplar diese Genauigkeitsangabe erfüllt. Viele Hersteller verzichten auf die Angabe, welcher prozentuale Anteil der ausgelieferten Geräte diese typische Genauigkeit besitzt. Jedoch kann angenommen werden, dass die typische Genauigkeit dem

Abb. 38:
Normalverteilung
der Genauigkeit



Erwartungswert des Fehlers plus oder minus der einfachen Standardabweichung (1σ) entspricht. Dies schließt dann ca. 68 % aller Exemplare ein. Das kann im Extremfall bedeuten, dass ein einzelnes Exemplar den dreifachen Messfehler des als »typisch« spezifizierten Fehlers aufweist.

Minimierung von Messfehlern im Betrieb

Bis auf die Hysterese und die Nichtwiederholbarkeit können die Messfehler einzelner Exemplare auch im Betrieb mit entsprechendem Aufwand weiter minimiert oder gar eliminiert werden.

Der Nullpunktfehler kann z. B. vom Anwender als Offset in die Auswerteeinheit eingepflegt und dadurch nahezu komplett eliminiert werden. Bei einem Messbereich, der bei 0 bar relativ startet, kann man dies recht einfach im drucklosen Zustand ablesen und »tarieren«.

Die Ermittlung des Spannefehlers ist für den Anwender meist etwas komplizierter, da dazu der Druck am Messbereichsende oder, noch besser, am gewünschten Arbeitspunkt exakt angefahren werden muss. Probleme entstehen dabei in der Praxis gewöhnlich dadurch, dass keine genügend genaue Referenz zur Verfügung steht.

Auch die Nichtlinearität eines individuellen Exemplars kann weiter minimiert werden, indem die Abweichung in der nachgeschalteten Elektronik an mehreren Unterstützungspunkten »herausgerechnet« wird. Hierzu ist ebenfalls ein hochpräzises Normal notwendig.

In einigen Anwendungen kann der gemessene Wert auch über andere Prozessparameter oder über die Dampfdruckkurve des Druckmediums mit dem Erwartungswert verglichen und entsprechend korrigiert werden.

Nullpunktfehler

Spannefehler

Nichtlinearität

Ausblick

Die präzise Messung von Drücken bildet die Grundlage für den sicheren und ökonomischen Ablauf vieler Prozesse. Erst mit der Verfügbarkeit moderner und zuverlässiger Druckmessgeräte und den in großen Stückzahlen kostengünstig gefertigten Drucksensoren ist eine Reihe neuartiger Fertigungsverfahren und Prozesse möglich geworden, wie z.B. spezielle Umformverfahren (Hydroforming) für Abgasreinigungsanlagen, die Hochdruckpasteurisation von Lebensmitteln, die energiesparende Regelung von Kompressoren und Pumpen, die Regelung von Systemdrücken bei der elektronischen Bremskraftregelung oder die präzise Steuerung der Einspritzung von Kraftstoffen.

Neue Anwendungen

Dennoch werden in Prozessen auch heute noch viel zu oft Drücke erzeugt, die weit über das für den optimalen Betriebspunkt Notwendige hinausgehen. So schätzen Experten, dass weltweit über 90 % der Kompressoren von Klimageräten und Kühlanlagen ohne präzise Druckmessung – und damit unwirtschaftlich – betrieben werden. Ein Großteil der Kompressoren für die Druckluftherzeugung und der Pumpen für die Wasserversorgung werden mit einfachen Druckschaltern statt mit einer bedarfsorientierten Druckregelung ausgerüstet. Bestrebungen nach höherer Energieeffizienz mehren deshalb die Anwendungen der elektronischen Druckmesstechnik Tag für Tag.

Permanente Weiterent- wicklung

Führende Hersteller von Druckmessgeräten und -sensoren investieren permanent in die Weiterentwicklung, um die Technik noch sicherer, zuverlässiger und ökonomischer zu machen. Sie tun dies in der Überzeugung, dass diese Technik auch in Zukunft einen erheblichen Beitrag zur Sicherheit und Ressourcenschonung leisten wird.

Glossar

BFSL Abk. von engl. *Best Fit Straight Line*: Hilfslinie zur Ermittlung der Nichtlinearität einer Kennlinie.

CAN Abk. von engl. *Controller Area Network*: asynchrones serielles Feldbussystem.

CE Abk. von franz. *Conformité Européenne*: Mit diesem Zeichen erklärt der Hersteller eines Produkts dessen Übereinstimmung mit EU-Richtlinien.

CVD Abk. von engl. *Chemical Vapor Deposition*: chemisches Beschichtungsverfahren.

DMS Abk. von Dehnungsmessstreifen: mäanderförmiger elektrischer Widerstand, der durch Verformung seinen Wert ändert.

EMV Abk. von *elektromagnetische Verträglichkeit*: der erwünschte Zustand, in dem technische Geräte einander nicht wechselseitig durch ungewollte elektrische oder elektromagnetische Effekte störend beeinflussen.

FEM Abk. von *Finite-Elemente-Methode*: numerisches Berechnungsverfahren.

FMEA Abk. von engl. *Failure Mode and Effects Analysis*: Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse; analytische Methoden der Zuverlässigkeitstechnik.

HART Abk. von engl. *Highway Addressable Remote Transducer*: standardisiertes Kommunikationssystem zum Aufbau industrieller Feldbusse.

IP Abk. von engl. *Ingress Protection* (dt. Eindringenschutz) oder auch *International Protection* (nach DIN): IP-Schutzarten nach DIN EN 60529 geben die Eignung von elektrischen

Betriebsmitteln für verschiedene Umgebungsbedingungen an.

MTTF Abk. von engl. *Mean Time To Failure*: mittlere Betriebsdauer bis zum Ausfall; statistische Kennzahl für elektronische Bauteile.

Piezoresistiver Effekt Veränderung des spezifischen Widerstands eines Materials durch Dehnung oder Stauchung.

PVD Abk. von engl. *Physical Vapor Deposition*: physikalisches Beschichtungsverfahren.

SI Abk. von franz. *Système international d'unités*: weltweit am weitesten verbreitetes Einheitensystem für physikalische Größen.

Vergleichsspannung Auch *Mises-Vergleichsspannung*: fiktive einachsige Spannung, die dieselbe Materialbeanspruchung darstellt wie ein realer mehrachsiger Spannungszustand.

Wheatstone'sche Messbrücke Messbrücke zur Messung von elektrischen Widerständen oder kleinen Widerstandsänderungen.

Wöhler-Kurve Diagramm, das bei Versuchen zur Dauerlastwechselfestigkeit von Werkstoffen aufgenommen wird.

Der Partner dieses Buches

WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG
Alexander-Wiegand-Straße
63911 Klingenberg
Tel. +49 9372 132-0
Fax +49 9372 132-406
info@wika.de
www.wika.de



Seit über 60 Jahren gilt die WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG als anerkannter Partner und kompetenter Spezialist für alle Aufgaben der Druck- und Temperaturmesstechnik. Mit der ständig steigenden Leistungsfähigkeit werden innovative Technologien in neue Produkte und Systemlösungen umgesetzt. Die Zuverlässigkeit der Produkte und die Bereitschaft, sich allen Herausforderungen des Marktes zu stellen, verhalfen WIKA, eine Spitzenposition im Weltmarkt zu erringen.

In der WIKA Firmengruppe stehen 6000 Mitarbeiter im Dienste des Fortschritts der Druck- und Temperaturmesstechnik. Mehr als 500 erfahrene Mitarbeiter der Vertriebsorganisation beraten Kunden und Anwender kompetent und partnerschaftlich.

Über 300 Ingenieure und Techniker forschen im Auftrag von WIKA nach innovativen Produkten, verbesserten Materialien und wirtschaftlicheren Produktionsmethoden. In enger Zusammenarbeit mit bedeutenden Universitäten, Instituten und Industrieunternehmen werden anwendungsspezifische Lösungen entwickelt.

Seit 1994 ist das WIKA Qualitätsmanagementsystem nach ISO 9001 zertifiziert. Seit 2003 ist zusätzlich die Entwicklung und Herstellung von Drucksensoren und Druckmessumformern für die Automobilindustrie bei WIKA Tronic nach dem weltweit gültigen Standard ISO/TS 16949 zertifiziert. Qualitäts- und Sicherheitsnormen unseres Unternehmens fanden Eingang in die Normsysteme mehrerer Staaten.

Umfassender Umweltschutz ist neben hoher Produktqualität und einem effizienten Arbeits- und Gesundheitsschutz ein gleichrangiges Unternehmensziel. Zusätzlich zur Erfüllung nationaler und internationaler Umweltgesetze und -vorschriften ist das Umweltmanagementsystem bei WIKA nach ISO 14001 zertifiziert.

Global denken, lokal handeln: WIKA ist rund um den Globus mit zahlreichen eigenen Niederlassungen und Handelsagenturen vertreten. Und weil wir vor Ort sind, kennen wir die jeweiligen landesspezifischen Bedürfnisse, Normen und Anwendungen. So stellen wir die individuelle Betreuung unserer Kunden sicher.

Unsere neuesten Bücher

Technik

- **Gewinderollen**
Eichenberger Gewinde
- **Konstruieren mit PTFE**
ErlingKlinger Kunststofftechnik
- **Modulare Werkzeugsysteme**
Komet Group
- **Industrielle Kaffeeveredelung**
Probat-Werke
- **Automation im Werkzeug- und Formenbau** *Zimmer+Kreim*
- **Blockzylinder** *AHP Merkle*
- **Flüssiggas** *Primagas*
- **Holzwerkstoff OSB** *Glunz*
- **Neuburger Kieselerde**
Hoffmann Mineral
- **Polycarbonates**
Bayer MaterialScience
- **Kran- und Aufzugtechnik** *Böcker*
- **Laborzentrifugen**
Andreas Hettich
- **Profilsysteme für den Maschinenbau** *MiniTec*
- **Sicherheits- und Überlastkupplungen**
R+W Antriebselemente
- **Frequenzumrichter**
Mitsubishi Electric
- **Polymers for Electrical Insulation**
Elantas

- **Lineare Bewegungstechnik**
Rexroth
- **8-Gang-Automatgetriebe für Pkw**
ZF Getriebe
- **Antriebsstrangprüftechnik**
AVL
- **Laserschweißen von Kunststoffen** *Treffert*
- **Hochpräzise Kunststoffteile für den Automobilbau** *Swoboda*
- **Hotmelt Moulding** *Henkel, mikkelsen, OptiMel, U. Kolb*
- **Kontaktlose Energieübertragung**
SEW-EURODRIVE

Wirtschaft

- **Direktbanking** *ING-DiBa*
- **Material Handling in Industrie und Distribution**
Linde Material Handling
- **Absatzfinanzierung**
GEFA Gesellschaft für Absatzfinanzierung
- **European Steel Distribution**
Klöckner & Co

Wissenschaft

- **Dosiersysteme im Labor**
Eppendorf
- **Wägetechnik im Labor** *Sartorius*



Süddeutscher Verlag onpact

Süddeutscher Verlag onpact GmbH
Hultschiner Straße 8
81677 München

Gesamtverzeichnis unter:

www.sv-onpact.de

Bestellungen unter:

bdt@sv-onpact.de

DIE BIBLIOTHEK DER TECHNIK

*Grundwissen mit dem Know-how
führender Unternehmen*

ISBN 978-3-937889-95-5



Ihr direkter Draht
zum Verlag:

www.sv-onpact.de