



ifm electronic

**Optimierung und Lösung
von technischen Abläufen
durch Sensorik, Kommunikations-
und Steuerungssysteme**

Schulungsunterlagen

efectors®

Drucksensoren

Schulungsunterlagen Drucksensoren, V1.5

Hinweis zur Gewährleistung:

Sämtliche auf diesem Datenträger veröffentlichten Daten sind geistiges Eigentum der ifm bzw. wurden uns teilweise von Kunden oder Lieferanten zur exklusiven Nutzung überlassen. Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass jedwede Verwertung (insbesondere Vervielfältigung, Verbreitung und Ausstellung) sowie Bearbeitung oder Umgestaltung nur nach vorheriger schriftlicher Zustimmung durch ifm zulässig ist.

Diese Schulungsunterlagen wurden unter Beachtung der größtmöglichen Sorgfalt erstellt. Gleichwohl kann keine Garantie für die Richtigkeit und Vollständigkeit des Inhalts übernommen werden.

Da sich Fehler trotz intensiver Bemühungen nie vollständig vermeiden lassen, sind wir für Hinweise jederzeit dankbar.

ifm electronic gmbh, Abteilung VTD-STV, Teichstr. 4, 45127 Essen, Tel.: 0201/2422-0,
Internet: www.ifm.com

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Drucksensoren im industriellen Einsatz	5
2	Druck	8
2.1	Physikalische Definition	8
2.2	Einheiten	10
2.3	Druckarten	12
2.4	Gesetze	13
2.4.1	Eigenschaften des Mediums	13
2.4.2	Schweredruck	14
2.4.3	Hydraulik	17
2.4.4	Kontinuitätsgleichung	18
2.4.5	Bernoullische Gleichung	19
2.4.6	Zeitverhalten	24
2.5	Werte	25
2.6	Relativ- und Absolutdruck	26
3	Druckmesstechnik	27
3.1	Übersicht	27
3.1.1	Sensor und Messgerät	27
3.1.2	Diagramm	27
3.1.3	Normung	28
3.2	Druckeinleitung und mechanische Wandlung	28
3.3	Membran	29
3.3.1	Druckmittler	29
3.3.2	Plattenfeder	30
3.3.3	Druckfestigkeit	31
3.3.4	Weitere Federformen	32
3.3.5	Messfehler	33
3.4	Mechanische Geräte	33
3.4.1	Manometer und Druckschalter	33
3.4.2	Eigenschaften des mechanischen Druckschalters	34
3.5	Wandlung mechanisch elektrisch	35
3.5.1	Übersicht	35
3.5.2	Dehnmessstreifen (DMS)	36
3.6	Kapazitive Sensoren	43
3.7	Zusammenfassung	47
4	Die ifm Drucksensor-Familie	47
4.1	Technik	48
4.1.1	Mechanische Wandlung	48
4.1.2	Wandlung mechanisch elektrisch	50
4.1.3	Signalerzeugung - primäre Elektronik	51

4.1.4	Signalverarbeitung	51
4.2	Geräte mit LED-Balken	53
4.2.1	Anzeige	53
4.2.2	Einstellen des Schaltpunktes	55
4.2.3	Hysterese	56
4.3	Geräte mit numerischem Display	58
4.3.1	Anzeige	58
4.3.2	Einstellen des Schaltpunktes	59
4.3.3	Hysterese	60
4.3.4	Einstellung des Fensters	60
4.3.5	Zeitverhalten	61
4.3.6	Übersicht	63
4.4	Geräte ohne Display	64
4.5	Übersicht der Geräte	66
4.5.1	Zusammenfassung	66
4.5.2	Mechanische Eigenschaften	67
4.5.3	Elektrische Eigenschaften	71
4.6	Highlights	72
4.7	Spezielle Applikationen	72
4.7.1	Mobiler Einsatz	73
4.7.2	Stationärer Einsatz	73
4.7.3	Anwendungsbeispiel	73
5	Kleines technisches Lexikon	74
5.1	Spezielle Sensortypen	74
5.2	Begriffe	75
5.3	Druckarten	80
6	Typenschlüssel	81

1 Einleitung

1.1 Drucksensoren im industriellen Einsatz

wo?

Prozess- und Verfahrenstechnik

Für Drucksensoren gibt es in vielen verschiedenen Marktsegmenten mit unterschiedlicher Bedeutung eine breite Palette von Anwendungen. Hier ist speziell die Prozess- und Verfahrenstechnik zu nennen. Die folgenden Abbildungen zeigen typische Anwendungen.

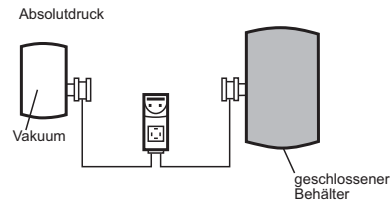


Abbildung 1: Absolutdruck

In Abbildung 1 ist die Bestimmung des Absolutdrucks dargestellt. Das heißt, es wird die Druckdifferenz zwischen einem mit einem Medium gefüllten Behälter und einem leer gepumpten Behälter bestimmt, vgl. 2.3 .

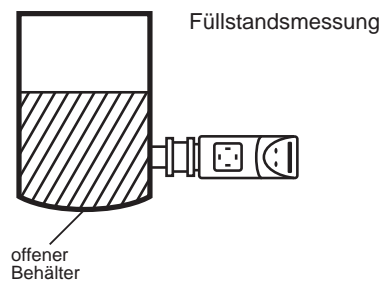


Abbildung 2: Füllstandsmessung 1

Die Abbildung 2 zeigt den Einsatz eines Drucksensors bei der Füllstandsbestimmung an einem offenen Behälter. Hierzu wird der Druck am Boden des Behälters gemessen, vgl. 2.4.2.

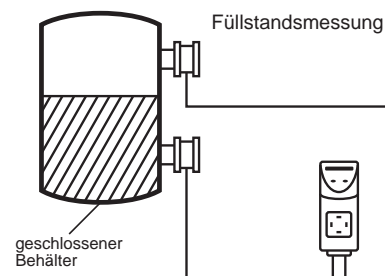


Abbildung 3: Füllstandsmessung 2

Auch die Abbildung 3 zeigt den Einsatz eines Drucksensors bei der Bestimmung des Füllstands, allerdings bei einem geschlossenen Behälter. Dabei wird die Differenz der Drücke am Boden des Behälters und im oberen, z. B. mit Gas gefüllten, Teil des Behälters gemessen, vgl. Beispiel 5, S. 15.

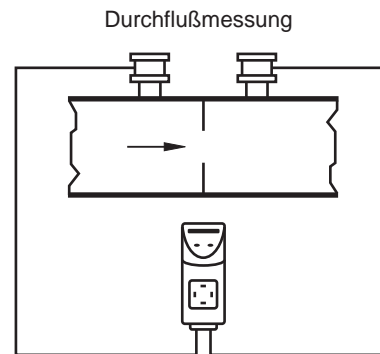


Abbildung 4: Durchflussmessung

Drucksensoren können auch, wie in der Abbildung 4 dargestellt, zur Durchflussmessung eingesetzt werden. Dabei wird die Druckdifferenz vor und hinter einer Blende gemessen, vgl. 2.4.5, Seite 19.

Was für ein Drucksensor ist hier dargestellt?

Es handelt sich um keinen speziellen Sensor. Die stilisierte Darstellung soll deutlich machen, dass es sich bei einer Druckmessung in der Regel um die Messung einer Differenz handelt. Auch in Abbildung 2 handelt es sich genau genommen um eine Differenzmessung, vgl. 2.3 Druckarten, auch wenn es nicht so offensichtlich wie bei den anderen Beispielen ist. Auch wenn die Darstellung in den Abbildungen dem Drucksensor der ifm nachempfunden ist, so gibt es zurzeit keinen Typ mit zwei Druckeinleitungen.

Hydraulik

Die ersten Typen mit Druckbereichen 100 bis 400 bar sind speziell für den Einsatz in der Hydraulik konzipiert, vgl. 4. Andere Typen bis etwa zum Bereich 25 bar sind für die Anwendung in der Pneumatik geeignet. Von den Gründen, die zum vielfältigen Einsatz der Hydraulik und der Pneumatik geführt haben, sollen hier nur zwei erläutert werden.

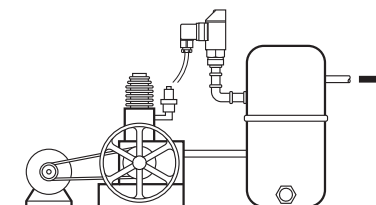


Abbildung 5: Speicherung von Energie

Die vom Antrieb gelieferte Energie kann leicht gespeichert werden. Deswegen muss der Antrieb nicht auf selten auftretende Lastspitzen sondern auf Dauerbetrieb ausgelegt sein.

Ein Blick ins Innere eines Druckspeichers verdeutlicht das, siehe Abbildung 6. Die weiße Fläche im Inneren stellt das komprimierte Medium dar. Ein elastischer „Sack“, schraffiert dargestellt, dient zum Druckausgleich.

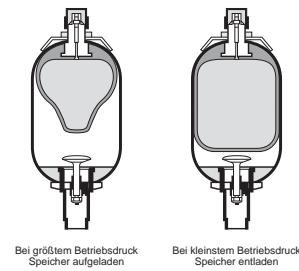


Abbildung 6: Druckspeicher

Die Kraft (siehe Abbildung 8), die über den Druck ausgeübt wird, kann auf einfache Weise, über Ventile, siehe Abbildung 7, gesteuert werden.

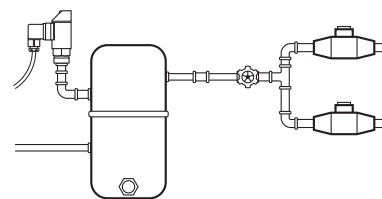


Abbildung 7: Ventile

Alle möglichen Arten von mechanischen Bewegungen können so bewirkt werden. Teilweise treten dabei beträchtliche Kräfte auf, vgl. Abbildung 8.

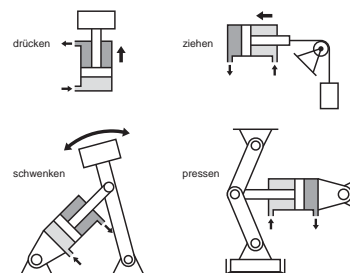


Abbildung 8: Mechanische Bewegungen

Die Liste der Beispiele ließe sich fast beliebig verlängern und differenzieren. Für die recht unterschiedlichen Anwendungs- und Einsatzfälle gibt es eine Reihe von Sensoren oder Messgeräten, die selbst auch in ihrer Funktionsweise recht unterschiedlich sind. Weiter unten im Text wird ein Überblick über die zurzeit gängigen Sensortypen und typische Einsatzgebiete gegeben.

Es liegen Studien vor, nach denen die Drucksensorik das bedeutendste Gebiet der Sensorik überhaupt darstellt.

Zurzeit sind auch noch mechanische Geräte im Einsatz, z. B. werden von der BASF jährlich 20000 Manometer eingesetzt. Wenn der Fortschritt der Automatisierung dazu führt, dass sie nach und nach von elektronischen Geräten abgelöst werden, lässt sich hier ein gewaltiges Potential erkennen.

wie?

Zwei Aspekte sind charakteristisch.

1. Die Mechanik kann nicht völlig ausgeschlossen werden. Der Druck führt zu einer mechanischen Verformung von Bauteilen des Drucksensors. Die Auswertung und Signalaufbereitung geschieht dann aber rein elektronisch.

2. Häufig besteht eine Anforderung an den Drucksensor darin, dass nicht nur ein Schalterpunkt eingestellt werden soll, sondern dass darüber hinaus auch der aktuelle Druck angezeigt werden soll. Es handelt sich dann nicht mehr um einen binären Sensor sondern um ein Messgerät.

Wie erwähnt, sind Typen mit Messbereichen bis 25 bar für Anwendungen in der Pneumatik geeignet. Typen mit Messbereich mit 1 bar sind zur Kontrolle von Füllständen geeignet, siehe 2.4.2, wobei hier besondere Anforderungen an die Auflösung gestellt werden. Bei vielen Handlingsautomaten, bei denen es auf schonende Behandlung der Werkstücke ankommt, werden Vakuumsauger verwendet. Z. B. für diese Applikation ist der Vakuumsensor gedacht.

2 Druck

2.1 Physikalische Definition

Was ist das?

Die geläufige Definition lautet: "Kraft pro Fläche"

(1)

$$p = \frac{F}{A}$$

p [Pa]: Druck; F [N]: Kraft; A [m²]: Fläche

Die Kraft F hat eine Richtung (die Kraft ist ein Vektor). Der Druck p dagegen hat keine Richtung (er ist ein Skalar)!

Einbaulage

Daraus ergibt sich sofort eine wichtige Konsequenz für Anwendungen des Drucksensors: die Einbaulage eines Drucksensors spielt keine Rolle! Um z. B. den Druck am Boden eines Gefäßes zu erfassen (vgl.), muss der Sensor nicht nach oben gerichtet sein. Eine weitere Konsequenz ist, dass sich der Gesamtdruck, z. B. der Druck am Boden eines offenen Gefäßes, einfach aus der Addition der Komponenten, also z. B. Schweredruck + Luftdruck, ergibt.

Wenn p kein Vektor ist, wohl aber F, wie lässt sich das in (1) berücksichtigen? Dazu muss die Formel umgestellt werden.

(2)

$$\vec{F} = p \vec{A}$$

p [Pa]: Druck; F [N]: Kraft; A [m²]: Fläche

Die Fläche wird als Vektor definiert. Die Richtung des Flächenvektors wird senkrecht zur Fläche definiert. Genau genommen gilt (2) für ebene Flächen und konstanten Druck (bei hinreichend "kleinen" Sensoren ist das gut erfüllt).

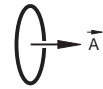


Abbildung 9 : Flächenvektor

senkrechte Richtung

Daraus ergibt sich eine wichtige Konsequenz: der Anteil (die Komponente) der Kraft senkrecht zur Fläche ist wesentlich! Anders gesagt, der Druck in einem Gefäß führt dazu, dass eine Kraft auftritt, die senkrecht zur Wand wirkt.

Mit diesen Grundinformationen wird deutlich, wie Druck gemessen werden kann. Wird ein Sensor in ein Medium gebracht, dann wirkt eine Kraft senkrecht zur Sensorfläche. Wenn diese Kraft zu einer mechanischen Verformung führt, kann also im Grunde über eine Wegmessung der Druck bestimmt werden. Bei elektronischen Geräten wird die Längenänderung in ein elektrisches Signal umgesetzt.

Druck → Kraft → mechanische Verformung → Längenänderung

Messgerät

Als einfaches Messgerät kann man sich z. B. einen Kolben vorstellen, der annähernd reibungslos verschoben werden kann. Auf der einen Seite herrscht der zu messende Druck, auf der anderen Seite ist eine Feder angebracht. In Abhängigkeit vom Druck wird die Feder mehr oder weniger komprimiert. Aus der Länge der Feder lässt sich der Druck bestimmen. Nach diesem Prinzip funktionieren mechanische Kolbendruckschalter, die bei Hydraulikanlagen den Systemdruck überwachen.

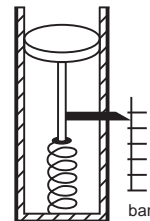


Abbildung 10: Messgerät

Man kann hier auch erkennen, dass es wesentlich ist, die Kraftkomponente senkrecht zur Fläche zu erfassen. Würde z. B. die Kolbenstange schräg auf dem Kolben sitzen (s. Abbildung 11), dann würde die Feder in zwei Richtungen verformt, nicht nur in Längsrichtung sondern auch quer dazu. Das würde zu einem Messfehler führen, da nur die Verformung in Längsrichtung gemessen wird. Dieses Problem tritt speziell dann auf, wenn die Kraft durch ein Gestänge übertragen wird. Bei modernen Geräten vermeidet man eine solche Kraftübertragung.

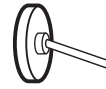


Abbildung 11: Fehlerhafte Kolbenstange

2.2 Einheiten

SI- (système international) Grundeinheiten sind m, kg und s. Andere Größen, wie z. B. Druck, sind davon abgeleitet. Diese Einheiten wurden in Deutschland in die DIN 1314 übernommen. Die Einheit für den Druck ist:

Pascal

$$1 \text{ Pascal} = 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

(1 N = 1 m kg/s² (Newton: Einheit der Kraft))

Diese Gleichung gibt also die Einheiten von () wieder.

Ist 1 Pa viel?

Bei allen Einheiten, mit denen man es zu tun hat, sollte man sich diese Frage stellen, um ein Gefühl für die Größenordnungen zu bekommen und um besser abschätzen zu können, ob das Ergebnis einer Berechnung fehlerhaft oder realistisch ist. Um sie in diesem Falle zu beantworten muss man sich klar machen, was 1 N bedeutet. Es hilft dabei, sich zu erinnern, dass die Einheit der Kraft zur Erinnerung an den Entdecker des Newtonschen Gesetzes:

„Kraft = Masse * Beschleunigung“
benannt wurde. Eine Kraft, mit der wir alle unmittelbar zu tun haben (mit der manche auch kämpfen) ist die Gewichtskraft. Die Beschleunigung ist in diesem Falle die Erdbeschleunigung $g \cong 10 \text{ m/s}^2$.

Beispiel 1

Eine Tafel Schokolade liegt auf einer Fläche von 1 m^2 . Wie groß ist der ausgeübte Druck?

Eine Tafel Schokolade hat üblicherweise (ganz gleich ob quadratisch oder rechteckig) eine Masse von $100 \text{ g} = 0,1 \text{ kg}$. Die (Gewichts-)Kraft ist also (Masse * Beschleunigung):

$$F = 0,1 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ N}$$

Da die Fläche gerade 1 m^2 beträgt, ergibt sich für den Druck:

$$p = 1 \text{ Pa}$$

Anmerkung: Da es sich meist um Schätzungen handelt, wurde hier und in den folgenden Beispielen nicht der exakte Wert ($9,81 \text{ m/s}^2$) für die Erdbeschleunigung eingesetzt sondern ein gerundeter Wert (10 m/s^2).

Das Beispiel 1 zeigt, dass 1 Pa recht wenig ist.

Eine Größe, die z. B. bei Wetterkarten verwendet wird, ist:

Hectopascal

$$1 \text{ Hectopascal} = 1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$$

Die Einheit Pascal wird in der Automatisierungstechnik selten verwendet. Man verwendet dort fast ausschließlich die Einheit:

bar

1 bar = 105 Pa

Ist 1 bar viel?

Nach Beispiel 1 entspricht 1 bar dem Druck, der von der Gewichtskraft einer Masse von 10^4 kg, d. h. von 10 t, auf 1 m^2 ausgeübt wird. Das ist also ganz beachtlich.

Der Druck ist also umso größer je größer die Masse oder je kleiner die Fläche ist. Der zweite Fall wird im nächsten Beispiel verdeutlicht.

Beispiel 2

Sie stehen auf einer Fläche von 1 cm^2 . Wie groß ist der Druck, den Sie ausüben?

Nach (1) erhält man:

$$p \cong \frac{70 \text{ kg} * 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{10^{-4} \text{ m}^2} = 7 * 10^6 \text{ Pa} = 70 \text{ bar}$$

Die Masse wurde zu 70 kg angenommen. Die (Gewichts-)Kraft ergibt sich zu Masse * (Erd-)Beschleunigung.

Beispiel 2 zeigt, weshalb spitze Absätze für empfindliche Bodenbeläge nicht geeignet sind. Es können enorme Druckwerte auftreten (vgl. Abschnitt 2.4.3).

Einheiten

Man findet gelegentlich noch Angaben in früheren oder in anderen Ländern gebräuchlichen Einheiten für den Druck. Die folgende Tabelle gibt dazu einen Überblick:

1 at =	1 atm =	1 mWS =	1 mmHg =	1 Torr =	1 psi =	1 Pa =	1 hPa =	
980,7	1013,3	98,07	1,333	1,333	68,97	10^{-2}	1	mbar

Abkürzungen

at: technische Atmosphäre
atm: physikalische Atmosphäre
mWS: Meter Wassersäule
mmHg: Millimeter Quecksilbersäule
psi: pound per square inch

Der Tabelle kann z. B. entnommen werden: 1 at = 980,7 mbar.

Die früheren Einheiten, z. B. at oder atm hatten den atmosphärischen Druck als Grundlage. Der Normaldruck war früher definiert als 1 atm. Er hat deshalb heute den „krummen“ Wert 1,013 bar. Da der Luftdruck von der Höhe (vgl. Abschnitt 2.4.2) und der Wetterlage (vgl. Abschnitt 2.5) abhängt, kann man in guter Näherung davon ausgehen, dass der Luftdruck ca. 1 bar beträgt. Diesem Druck sind wir also ständig ausgesetzt. Der Organismus hat sich natürlich darauf eingestellt. Darin liegt auch der Grund, weshalb wir nicht im Vakuum existieren können.

Eine weitere Einheit, die früher verwendet wurde, ist das atü (atmosphärischer Überdruck). Bei vielen technischen Anwendungen ist es praktisch, den Druck auf den Atmosphärendruck zu beziehen. Die atü-Skala geht aus der at-Skala durch Verschiebung des Nullpunktes um eine Einheit hervor. So ist z. B.

1 at = 0 atü.

Es ist dann auch

0,9 at = - 0,1 atü.

Die Einheit psi (pound per square inch) wird in englischsprachigen Ländern verwendet (siehe auch das Lexikon im Anhang).

Die Einheiten mWS (Wassersäule) und mm Hg (Quecksilbersäule) wurden aus den verwendeten Messgeräten abgeleitet. Wird z. B. ein U-Rohr verwendet, in das Wasser eingefüllt ist, und führt man den zu messenden Druck auf die eine Seite während die andere Seite offen ist, so gibt der Höhenunterschied den Überdruck in mWS wieder (s. Abbildung 12). Solche Messgeräte waren früher (für geringe Druckwerte) z. B. in der Gebäudetechnik weit verbreitet. Da es sich um geringe Druckunterschiede handelt, wurde auch die abgeleitete Einheit mmWS (Millimeter Wassersäule) verwendet.

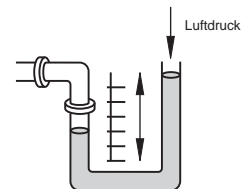


Abbildung 12: Druckmessung mit Wasser

Quecksilberbarometer

Ist das Rohr mit Quecksilber gefüllt und eine Seite geschlossen, so dass hier Vakuum herrscht (abgesehen vom Dampfdruck des Quecksilbers), und lässt man die andere Seite offen, so gibt hier der Höhenunterschied den Atmosphärendruck in mm Hg wieder (s. Abbildung 13). Solche Quecksilberbarometer trifft man gelegentlich noch an. Sie werden für Präzisionsmessungen eingesetzt. Für industrielle Anwendungen sind sie wegen der Giftigkeit des Quecksilbers problematisch. In der Medizin, zur Blutdruckmessung, werden teilweise noch Quecksilbermanometer verwendet.

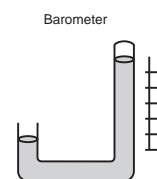


Abbildung 13: Druckmessung mit Quecksilber

2.3 Druckarten

Was soll das sein?

An den voran stehenden Beispielen erkennt man, dass es sich bei einer Druckmessung häufig um eine Relativdruckmessung handelt. Der Zusammenhang und die Bedeutung der Bezeichnungen, die auch in der oben erwähnten Norm verwendet werden, soll an der folgenden Übersicht verdeutlicht werden. Man spricht hier je nach der zu bestimmenden Größe auch von Druckarten.

Das Messgerät nimmt einen Differenzdruck auf, z. B. ein mit Wasser gefülltes U-Rohr wie in Abbildung 12. Die beiden Drücke sollen mit p_1 und p_2 bezeichnet werden.

Es soll angenommen werden, dass die Anzeige proportional der Druckdifferenz ist, also:

$$\text{Anzeige} \propto p_1 - p_2$$

Folgende Fälle werden unterschieden:

1. p_1 und p_2 haben beliebige Werte	2. p_2 ist ein fester Referenzdruck
<p>Bezeichnung: Bidirektionaler Differenzdruck (engl. Vented Gauge VG)</p> <p>Spezialfall: $p_2 = \text{Luftdruck}$ Bezeichnungen: Relativdruck Überdruck (positiv oder negativ)</p>	<p>Bezeichnung: Unidirektionaler Differenzdruck (engl. Sealed Gauge SG) manchmal auch: Überdruck SG</p> <p>Spezialfall: $p_2 = 0$ (Vakuum) Bezeichnung: Absolutdruck</p>

Im Folgenden wird der Begriff Überdruck im Sinne der Differenz zum Luftdruck verwendet.

Unterdruck

Die Bezeichnung Unterdruck ist nicht zulässig. Die Norm für elektrische Druckmessgeräte, DIN 16 086, schreibt hierfür ausdrücklich die Bezeichnung "negativer Überdruck" vor.

2.4 Gesetze

2.4.1 Eigenschaften des Mediums

Der Druck ist eine Größe, die bei flüssigen und gasförmigen Medien bestimmt wird (im Prinzip auch bei Schüttgütern, das sind aber Sonderfälle). Diese unterscheiden sich u. a. durch folgende Eigenschaften:

Kompressibel

Hier hängt das Volumen und damit die Dichte vom Druck ab. Das ist bei gasförmigen Medien der Fall. Bei den Gesetzen weiter unten wird in der Regel dieser Fall nicht berücksichtigt, weil dabei die Zusammenhänge komplexer werden.

Inkompressibel

Flüssigkeiten, z. B. Wasser oder Hydraulik-Öl, sind in guter Näherung inkompressibel. D. h., das Volumen hängt nicht vom Druck ab. Zur Kennzeichnung wird der Zusatz "hydro" verwendet, z. B. Hydrostatik.

Bezeichnungen

Man unterscheidet eine Reihe von Spezialfällen. Dabei werden folgende Bezeichnungen verwendet:

- Statik

Damit wird der Spezialfall des Kräftegleichgewichts, bei dem keine Bewegung auftritt, bezeichnet. Das heißt Druckunterschiede haben sich ausgeglichen, es tritt keine Strömung auf.

- Dynamik

Bei strömenden Medien sind folgende Fälle von Bedeutung:

Stationäre Strömung

Wenn ein Medium gleichförmig fließt, das heißt, wenn die Strömungsgeschwindigkeit in jedem Punkt über die Zeit konstant ist, spricht man von einer stationären Strömung. Das bedeutet nicht, dass sie an jedem Ort gleich ist. Auch bei einer stationären Strömung, z. B. in einem Rohr, wird die Geschwindigkeit in der Mitte größer sein als am Rand. Der instationäre Fall, z. B. die Bildung von Wirbeln oder der Vorgang nach dem Öffnen eines Ventils, ist rechnerisch schwer zu erfassen und wird hier nicht behandelt.

Laminare Strömung

Damit wird die Strömung ohne Wirbel bezeichnet. Man kann sich dann die Strömung in dünne Schichten (lat. lamina) zerlegt denken, die bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten aneinander vorbei gleiten.

Reibung

Man unterscheidet zwischen den Reibungskräften, die an einer Wand auftreten und der so genannten inneren Reibung, der die Strömungspartikel durch die gegenseitige Wechselwirkung unterliegen. Bei der laminaren Strömung kann man darunter die Reibung einer Schicht an der anderen verstehen. Der Parameter dafür ist die Viskosität des Mediums. Die Wirkung von Reibungskräften auf eine Strömung ist rechnerisch ebenfalls schwer zu erfassen. Sie hängt ab von den Parametern:

- Rauigkeit der Wand
- Strömungsgeschwindigkeit
- Geschwindigkeitsprofil
- Dichte
- Viskosität

Die Viskosität ist wiederum abhängig von der Temperatur, so dass diese auch einen Einfluss auf die Reibung hat.

2.4.2 Schweredruck

Im Abschnitt 2.1 , Physikalische Definition, wurde betont, dass der Druck keine Richtung hat. Man formuliert das auch so, dass sich der Druck gleichmäßig im gesamten Medium ausbreitet. Diese Aussage muss aber noch etwas präzisiert werden.

Bedeutet das, dass der Druck in einem gefüllten Behälter überall konstant ist?

Nein! Der Boden des Gefäßes muss ja noch zusätzlich die Gewichtskraft der auf ihm lastenden "Flüssigkeitssäule" aufnehmen.

Bei kompressiblen Medien, Stichwort Pneumatik, sind die Zusammenhänge meist etwas komplizierter. Sie werden im Folgenden nur kurz angesprochen. Der Schwerpunkt wird auf den inkompressiblen Medien liegen. Diese beiden Fälle werden im Folgenden kurz besprochen.

Inkompressibles Medium

Die Masse ist:

Dichte mal Volumen = Dichte mal Grundfläche mal Höhe.

$$\rho V = \rho A h$$

Der zusätzliche Druck also die Kraft pro Fläche ist dann:

$$(3) \quad \rho = \frac{F}{A} = \frac{\rho A h g}{A} = \rho g h$$

p [Pa]: Druck; F [N]: Kraft; A [m²]: Fläche; ρ [kg/m³]: Dichte; h [m]: Höhe; g [m/s²]: Erdbeschleunigung = 9,81 m/s² \approx 10 m/s²

Der Druck ist hier direkt proportional zur "Tiefe" h . Dieser Zusammenhang ist unabhängig von der Form und vom Querschnitt des Gefäßes (so genanntes hydrostatisches Paradoxon).

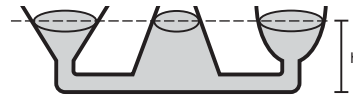


Abbildung 14: Hydrostatisches Paradoxon

Füllstand

Man kann also mit einem Druckmessgerät, das am Boden eines Behälters angebracht ist, den Füllstand messen.

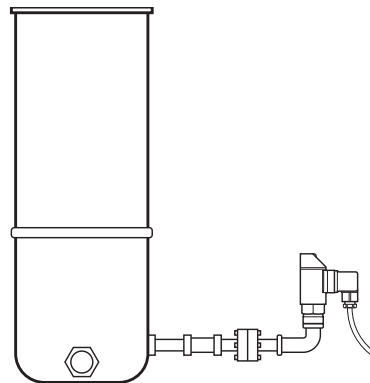


Abbildung 15: Füllstandsmessung

Beispiel 3

Bei einem Wasserturm befinden Sie sich 15 m unter dem Wasserspiegel. Wie groß ist der Wasserdruck in dieser Höhe?

Aus (3) erhält man:

$$p \approx 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 15 \text{ m} = 15 \cdot 10^4 \text{ Pa} = 1,5 \text{ bar}$$

Beispiel 4

In der Situation von Beispiel 3 entdecken Sie ein Leck, aus dem das Wasser schießt. Es hat eine Fläche von 1 cm². Das Reservoir ist mit 100000 l gefüllt. Schaffen Sie es, das Leck zuzuhalten?

Aus (1) erhält man:

$$F = 15 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 15 \text{ N}$$

Das entspricht der Gewichtskraft von 1500 g. Es ist also zu schaffen, mit einem Finger das Leck zuzuhalten (Die Füllmenge spielt dabei überhaupt keine Rolle, wie aus (3) zu erkennen ist). Probieren Sie das aber lieber nicht bei einer Hydraulik-Leitung!

Beispiel 5

Ein Behälter ist bis zu einer Höhe von 50 cm mit Wasser gefüllt. Darauf befindet sich eine 10 cm dicke Ölschicht. Wie groß ist der Druck am Boden?

Wie oben erwähnt wurde, ist Druck ein Skalar. Der gesamte Druck ergibt sich als Summe der Teildrücke.

$$\begin{aligned}
 p &= p_1 + p_2 \\
 &\cong (1000 \text{ kg/m}^3 * 10 \text{ m/s}^2 * 0,5 \text{ m}) \\
 &+ (300 \text{ kg/m}^3 * 10 \text{ m/s}^2 * 0,1 \text{ m}) \\
 &= 5000 \text{ Pa} + 300 \text{ Pa} = 5300 \text{ Pa} = 0,053 \text{ bar}
 \end{aligned}$$

Das Öl liefert also einen relativ geringen Beitrag.

Relativdruck

In den drei Beispielen wurde der Relativdruck zum Luftdruck oder der Überdruck berechnet. Der äußere Luftdruck wurde nicht berücksichtigt. Er hebt sich auf, weil er auf der Innen- und der Außenseite der Wand gleich ist. Bei den relativ geringen Höhenunterschieden kann er als auch als konstant betrachtet werden. Der gesamte Druck ergibt sich wie in Beispiel 5 als Summe der einzelnen Komponenten.

Das nächste Beispiel zeigt, dass der Luftdruck bei geschlossenen Gefäßen beachtet werden muss.

Beispiel 6

Das Wasserreservoir im Wasserturm ist mit Öffnungen versehen, um den Druckausgleich mit dem Luftdruck herzustellen. Angenommen der Behälter ist bis oben gefüllt, diese Öffnungen sind verstopft und es fließt wie in Beispiel 4 unten Wasser aus. Was wird weiter geschehen?

Das Wasser kann ausfließen bis es eine Höhe von 10 m erreicht hat. Dann ist der äußere Luftdruck (ca. 1 bar) genau so groß wie der Schweredruck des Wassers (10 m WS entspricht etwa 1 bar). Es kann nichts mehr ausfließen. In der Praxis könnten Luftblasen durch die Öffnung eindringen, die den Druckunterschied ausgleichen. In der angenommenen Situation würde das aber sehr langsam geschehen. Daher wäre der Wasserbehälter sehr gefährdet. Angenommen es herrscht über der Wasseroberfläche praktisch Vakuum und die Querschnittsfläche beträgt 10 m². Der auf dem Behälter lastende Luftdruck übt eine beträchtliche Kraft aus.

$$F = 105 \text{ Pa} * 10 \text{ m}^2 = 106 \text{ N}$$

Das entspricht der Gewichtskraft von 100 Tonnen.

Bei einem geschlossenen Behälter muss also nicht nur darauf geachtet werden, dass die Wand dem inneren Druck widerstehen kann sondern auch dem äußeren Luftdruck, falls er vollständig geleert wird, ohne dass Luft einströmen kann. Grosse Behälter, z. B. die Kammern eines Öltankers, können durch nicht sachgemäße Entleerung, d. h. Entleerung ohne Druckausgleich, zerstört werden.

Die Bestimmung der Füllhöhe eines Behälters durch eine Druckmessung kann also genau genommen nur durch eine Differenzdruckmessung erfolgen. Im Falle des offenen Behälters ist es eine Relativdruckmessung. Beim geschlossenen Behälter muss die Druckdifferenz zwischen dem Boden und dem Raum über dem Medium bestimmt werden (vgl. Abbildung 3).

Kompressibles Medium

Hier ist der Zusammenhang etwas komplizierter. Es ergibt sich, dass der Druck näherungsweise exponentiell mit der Höhe abnimmt.

h	0	500	1000	1500	2000	3000	4000	5000
p	1013	954	901	848	795	703	616	540

h [m]: Höhe über Meeresspiegel
p [mbar] Luftdruck

Wann kann der Schweredruck vernachlässigt werden?

Dieser zusätzliche Druck, der Schweredruck, kann unter zwei Bedingungen vernachlässigt werden.

Höhenunterschied

1. Es treten keine großen Höhenunterschiede auf.
Die pneumatischen Sensoren und Aktuatoren einer Anlage weisen meist keine großen Höhenunterschiede auf, so dass hier der unterschiedliche Luftdruck vernachlässigt werden kann. Hier wird mit einem Systemdruck von ca. 6 bar gearbeitet. Selbst wenn z. B. zwischen zwei Aktuatoren ein Höhenunterschied von 100 m auftritt, so unterscheidet sich der Luftdruck an den beiden Höhen nur um ca. 1 %, d. h. 10 mbar (auf Normalniveau). Wird dagegen eine Anlage in Hamburg montiert, die anschließend auf der Zugspitze arbeiten soll, dann sollte der unterschiedliche Luftdruck an diesen beiden Orten bedacht werden (vgl. oben stehende Tabelle).

Hoher Druck

2. Es wird mit so hohen Drücken gearbeitet, dass der Schweredruck nur einen geringen Beitrag liefert.
Dieser Fall trifft meist für die Hydraulik zu. Hier wird mit Drücken in der Größenordnung 100 bar gearbeitet.

Beispiel 7

Bei einer Hydraulikanlage mit einem Systemdruck von 100 bar haben wir einen Höhenunterschied von 10 m zwischen zwei Zylindern (vgl. Abbildung 16). Welchen Beitrag liefert der Schweredruck zum Gesamtdruck?

Wir nehmen für die Dichte des Hydrauliköls einen typischen Wert von $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$ an. In der Regel wird er eher darunter liegen. Dann ergibt sich aus (3)

$$\Delta p = 900 \text{ kg/m}^3 * 10 \text{ m/s}^2 * 10 \text{ m} = 9 * 10^4 \text{ Pa} = 0,9 \text{ bar}$$

Das ist weniger als 1 % des Systemdrucks.

2.4.3 Hydraulik

Am Beispiel dieses bedeutenden Anwendungsgebiets sollen kurz einige wichtige Gesetze formuliert werden.

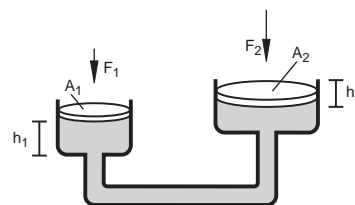


Abbildung 16: Hydraulische Presse

Hydraulische Presse

Hat man zwei Zylinder mit unterschiedlichen Querschnittsflächen A_1 und A_2 , die mit einem inkompressiblen Medium gefüllt sind und die von reibungsfrei beweglichen Kolben abgeschlossen werden, miteinander verbunden, so herrscht an beiden Kolben mit den genannten Voraussetzungen der gleiche Druck. Aus (1) ergibt sich dann für die Kräfte:

(4)

$$p = \frac{F}{A} = \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

p [Pa]: Druck; F [N]: Kraft; A [m²]: Fläche

oder

(5)
$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

 F [N]: Kraft; A [m²]: Fläche

Diese Gleichungen beschreiben z. B. die hydraulische Presse. Diese wird manchmal auch als "Krafttransformator" bezeichnet.

Beträgt z. B. die zweite Fläche 1/100 der ersten, dann hat man an der ersten Fläche eine um den Faktor 100 höhere Kraft.

Bei vielen Anwendungen wird daher Hydraulik eingesetzt, wenn große Kräfte benötigt werden, siehe auch Abbildung 8.

Wie verhält es sich dabei mit der Arbeit? Wird der erste Kolben um den Weg h_1 verschoben, dann verschiebt sich der zweite um h_2 . Da auch die hydraulische Presse kein Perpetuum Mobile ist, muss gelten (Arbeit = Kraft mal Weg):

(6)
$$F_1 h_1 = F_2 h_2$$

 F [N]: Kraft
 h [m]: Höhe

Auch hier muss durch den Weg ausgeglichen werden, was an Kraft gewonnen wird. In diesem Zusammenhang ist es interessant, das Ergebnis auch auf andere Weise zu erhalten. Wenn sich der erste Kolben um h_1 bewegt, dann wird dort das Volumen $A_1 h_1$ verdrängt. Das gleiche Volumen muss im zweiten Kolben dazu kommen (Hydrauliköl ist inkompressibel). Damit ist:

(7)
$$A_1 h_1 = A_2 h_2$$

 A [m²]: Fläche; h [m]: Höhe

Daraus ergibt sich mit (5) wieder (6).

2.4.4 Kontinuitätsgleichung

Bewegt sich der erste Kolben mit der Geschwindigkeit $v_1 = h_1/t$ und entsprechend der zweite mit $v_2 = h_2/t$ (stationärer Fall), dann ergibt sich aus (7):

(8)
$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

 A [m²]: Fläche; v [m/s]: Geschwindigkeit

Das ist die so genannte Kontinuitätsgleichung. Sie besagt einfach, dass alles, was auf der einen Seite hineinfließt, auch wieder auf der anderen Seite herauskommt. Sie beschreibt auch den von Anwendungen des Strömungswächters bekannten Sachverhalt, dass die Strömungsgeschwindigkeit bei einer Verengung des Durchmessers steigt. Die Kontinuitätsgleichung ist nicht nur in der Hydraulik von Bedeutung, sie gilt in dieser Form für alle inkompressiblen Medien, z. B. auch für Wasser in der Wasserleitung.

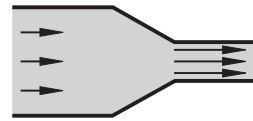


Abbildung 17: Strömungsgeschwindigkeit und Rohrdurchmesser

Verringert sich z. B. die Querschnittsfläche auf die Hälfte, dann muss die Geschwindigkeit auf das doppelte steigen.

Die Geschwindigkeit (gemessen in m/s) ist nicht zu verwechseln mit dem Durchfluss (gemessen in l/s oder m³/s). Der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen wird weiter unten diskutiert.

2.4.5 Bernoullische Gleichung

In manchen Fällen kann es nützlich sein, den Zusammenhang (1) mit Hilfe einer Dimensionsbetrachtung noch anders zu formulieren. Zuerst noch einmal in Worten:

$$\boxed{\text{Druck}} \quad \text{als Formel:} \quad p = \frac{F}{A}$$

p [Pa]: Druck; F [N]: Kraft; A [m²]: Fläche

Mit dem Weg erweitert ergibt sich:

$$\text{Druck} = \frac{\text{Kraft} * \text{Weg}}{\text{Fläche} * \text{Weg}} \quad \text{als Formel:} \quad p = \frac{F * s}{A * s}$$

p [Pa]: Druck; F [N]: Kraft; A [m²]: Fläche; s [m]: Weg

also:

$$(9) \quad \text{Druck} = \frac{\text{Energie}}{\text{Volumen}} \quad \text{als Formel:} \quad p = \frac{W}{V}$$

p [Pa]: Druck; W [J]: Energie; V [m³]: Volumen

Der Druck kann also auch als die in einem Volumen gespeicherte Energie, die Energiedichte, verstanden werden.

Fließt ein inkompressibles Medium durch ein Rohr, so erhöht sich wie erwähnt die Strömungsgeschwindigkeit, wenn sich der Querschnitt verringert. Das bedeutet, dass sich die kinetische Energie erhöht. Woher kommt diese Energie?

(9) liefert die Antwort auf diese Frage. Der Druck muss sich verringern. Der Zusammenhang ist:

$$(10) \quad p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const.}$$

p [Pa]: Druck; ρ [kg/m³]: Dichte; v [m/s]: Geschwindigkeit

Das ist die Bernoullische Gleichung. In der Formel (10) sind Höhenunterschiede und eventuelle Reibungsverluste nicht berücksichtigt.

Im stationären Fall erhöht sich die Geschwindigkeit nicht, wenn der Druck steigt. Im Gegenteil, der Druck nimmt seinen maximalen Wert, den so genannten Staudruck, an, wenn die Geschwindigkeit Null ist. Umgekehrt ergibt sich die maximale Geschwindigkeit, wenn der Druck Null ist.

Eine Anwendung der Drucksensorik besteht darin, dass die Strömungsgeschwindigkeit (eigentlich der Volumenstrom, siehe (14)) über den Druck bestimmt wird (Prandtl'sches Staurohr, Venturi-Rohr, Messblende). Ein Drucksensor lässt sich also auch als Strömungssensor einsetzen. Zur Auswertung wird die Bernoullische Gleichung (10) verwendet.

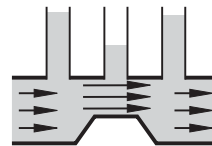


Abbildung 18 : Strömungsmessung

Um das deutlich zu machen schreiben wir (10) etwas anders:

$$(11) \quad p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

p [Pa]: Druck; ρ [kg/m³]: Dichte; v [m/s]: Geschwindigkeit

Die Indizes ₁ bzw. ₂ stehen für die Werte bei unterschiedlichen Durchmessern. Das Verhältnis der Querschnittsflächen A_1 und A_2 muss bekannt sein. Die Druckdifferenz wird durch eine Messung ermittelt. Die Geschwindigkeit v_2 wird mit (8) eliminiert.

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1$$

A [m²]: Fläche; v [m/s]: Geschwindigkeit

Dann löst man (11) nach v_1 auf.

$$(12) \quad v_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_2 - p_1) \frac{A_2^2}{A_2^2 - A_1^2}}$$

p [Pa]: Druck; ρ [kg/m³]: Dichte; v [m/s]: Geschwindigkeit; A [m²]: Fläche

Wurzelfunktion

Zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit über eine Druckmessung muss also eine Druckdifferenz ermittelt werden. Charakteristisch ist bei allen solchen Vorrichtungen die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Wurzel aus der Druckdifferenz. Wenn z. B. eine Vorrichtung wie in Abbildung 12 zur Geschwindigkeitsmessung verwendet wird, dann findet man bei solchen Messgeräten keine linear geteilte Skala sondern eine Skala, die nach der Wurzelfunktion geteilt ist.

Zunächst soll veranschaulicht werden, wie sich die Energie auf den Druck und die Bewegung aufteilt.

Beispiel 8

In einem Rohr herrscht ein (Relativ-)Druck von 1 bar (= 10^5 Pa). Das Medium Wasser ($\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$) fließt mit 1 m/s. Welchen Anteil haben Druck und kinetische Energie an der Gesamtenergie?

(10) liefert:

$$105 \text{ Pa} + 0,5 * 103 \text{ kg/m}^3 * (1 \text{ m/s})^2 = 1,05 * 105 \text{ J/m}^3$$

Die Geschwindigkeit trägt also nur ca. 5% zur Gesamtenergie bei.

In Bereichen hoher Drücke, z. B. 100 bar liefert also die Geschwindigkeit nur einen sehr geringen Beitrag, hier ist der Drucksensor nicht als Strömungssensor geeignet, weil für die Auswertung nach (12) eine Druckdifferenz in der Größenordnung von Promille zu messen wäre.

Beispiel 9

Aus dem Rohr von Beispiel 8 tritt Wasser aus einer kleinen Öffnung senkrecht nach oben aus. Wie hoch spritzt es?

Das können wir uns mit der Gleichung (11) klar machen. p_1 beträgt 1 bar. Wegen der engen Öffnung ist nach (8) die Geschwindigkeit v_2 viel größer als v_1 im Rohr, weil die Querschnittsfläche viel geringer ist. Da die Geschwindigkeit überdies quadratisch eingeht lässt sich v_1 vernachlässigen. p_1 stellt den Überdruck gegen den Luftdruck dar. p_2 ist daher Null. Wir brauchen den Wert der Geschwindigkeit nicht zu berechnen, es soll ja die Höhe ermittelt werden. Am höchsten Punkt hat sich die Geschwindigkeit aufgezehrt. Die kinetische Energie wurde in Lageenergie umgewandelt. Sie beträgt mgh . Aus(10) ergibt sich also für diesen Fall:

$$p_1 = \rho g h \quad \text{oder} \quad h = \frac{p_1}{\rho g}$$

p [Pa]: Druck; ρ [kg/m^3]: Dichte; g [m/s^2]: Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2 \cong 10 \text{ m/s}^2$);
 h [m]: Höhe

$$h = \frac{10^5 \text{ Pa}}{10^3 \text{ kg/m}^3 * 10 \text{ m/s}^2} = 10 \text{ m}$$

Das Ergebnis hätte man auch aus der Plausibilitätsbetrachtung erhalten können, dass 1 bar 10 mWS entspricht. In der Praxis wird dieser Wert auf Grund der Vernachlässigungen und vor allem durch Reibungsverluste erheblich geringer sein.

Reibung

Die Bernoullische Gleichung stellt den Energiesatz für Strömungen dar. In einem langen Rohr mit konstantem Querschnitt haben wir wegen der Kontinuitätsgleichung überall die gleiche Geschwindigkeit. Nach der Bernoullischen Gleichung (10) haben wir überall den gleichen Druck. In der Praxis stellt man aber einen Druckabfall fest. Wie kommt dieser zustande? Bei der Bernoullischen Gleichung sind keine Reibungsverluste berücksichtigt. In Wirklichkeit tritt aber fast immer eine mehr oder weniger große Reibungskraft auf, deren Wirkung in der Energiebilanz natürlich berücksichtigt werden muss. Es wird wie z. B. auch bei der Bremse am Auto Wärme erzeugt. Das lässt sich durch einen zusätzlichen Summanden in (10) berücksichtigen:

(13)
$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + w_R = \text{const.}$$

p [Pa]: Druck; ρ [kg/m³]: Dichte; v [m/s]: Geschwindigkeit; wR [J/m³]: Arbeit der Reibungskraft pro Volumen; \rightarrow Wärme pro Volumen

wieso Druckabfall?

Warum führt dieser Effekt zu einem Druckabfall und nicht dazu, dass sich die Geschwindigkeit verringert, wie es häufig sonst bei Reibung der Fall ist? Durch ein Rohr mit rauer Oberfläche fließt, bei ansonsten gleichen Bedingungen, weniger als durch ein glattes Rohr. Die Geschwindigkeit ist also geringer als im Fall ohne Reibung. Da aber immer noch gilt, dass an einem Ende des Rohres genau soviel herauskommen muss, wie am anderen Ende hineinfließt, das heißt, dass die Kontinuitätsgleichung (8) immer noch gilt, muss die Geschwindigkeit gleich bleiben. Auch wenn bei einem Rohr unterschiedliche Rauigkeit auftritt, dann kann auch hier die Geschwindigkeit nicht an einem Ort größer und am anderen geringer sein. Die Geschwindigkeit muss auch in diesem Fall konstant sein. (Das stellt keinen Widerspruch dazu dar, dass die Geschwindigkeit in der Mitte des Rohres größer ist als am Rand, vgl. den übernächsten Absatz).

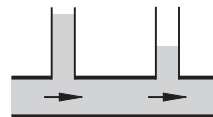


Abbildung 19: Druckabfall durch Reibung

hohe Temperaturen

Die Wärme kann also nur auf Kosten des Drucks entstehen. In der Praxis ist es schwierig, den Betrag genau zu bestimmen, weil hier die Parameter, die im Abschnitt 2.4.1 (unter dem Punkt "Reibung") genannt wurden, zu berücksichtigen sind.

Wenn z. B. an einem Engpass Wirbel auftreten, dann wird durch die Reibungskraft nicht sofort Wärme entstehen. Die Wärme entsteht erst, wenn die Wirbel durch die innere Reibung an einem anderen Ort aufgezehrt werden. Wichtig ist aber die Konsequenz, dass sich bei schlecht konzipierten Hydraulikanlagen im Betrieb die Hydraulikflüssigkeit auf Temperaturen von bis zu 100°C erhitzen kann.

Dieser Druckabfall wird auch zur Messung des Durchflusses benutzt. Bevor die Messung beschrieben wird, soll noch der Zusammenhang zwischen Durchfluss und Strömungsgeschwindigkeit besprochen werden.

Durchfluss

In der Praxis ist weniger die tatsächliche Geschwindigkeit an einem Punkt sondern der Durchfluss, genauer gesagt der Volumenstrom (Volumen / Zeit), von Bedeutung. Die Geschwindigkeit ist nicht überall konstant, selbst bei konstantem Durchmesser. Sie ist z. B. in der Mitte des Rohres höher als am Rand und ist bei turbulenter Strömung sehr schwer zu erfassen. Zur Vereinfachung kann man sich vorstellen, dass das Medium mit einer mittleren Geschwindigkeit v_m fließt (ähnlich wie Zahnpasta aus der Tube kommt), dann kann man sich den Zusammenhang durch eine Dimensionsbetrachtung klar machen.

Geschwindigkeit = $\frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$ mit Weg * Fläche = Volumen erhält man:

$$v_m = \frac{s}{t} = \frac{s * A}{t * A} = \frac{V}{t * A}$$

v_m [m/s]: mittlere Geschwindigkeit; s [m]: Weg; t [s]: Zeit; A [m²]: Fläche; V [m³]: Volumen

oder

(14)

$$Q = \frac{V}{t} = v_m A$$

Q [m³/s]: Volumenstrom, Durchfluss; v_m [m/s]: mittlere Geschwindigkeit; t [s]: Zeit; A [m²]: Fläche; V [m³]: Volumen

Dem Durchfluss Q (Volumen/Zeit) bei Strömungen entspricht übrigens bei elektrischem Strom die Stromstärke (Ladung/Zeit).

Nachdem der Begriff Durchfluss erläutert wurde, soll nun die Durchflussmessung mit dem Differenzdruckverfahren beschrieben werden.

Durchflussmessung

Bringt man in einem Rohr eine Blende an, verengt man das Rohr also an einer Stelle, so hat man bei reibungsfreier Strömung nach (11) vor und hinter der Blende den gleichen Druck, weil nach (8) die Geschwindigkeit gleich ist.

Bei einer realen Strömung ergibt sich aber wegen Reibungsverlusten nach (13) ein Druckabfall. Dieser ist ein Maß für den Durchfluss. Da aber, wie gesagt, der Effekt von vielen Parametern abhängt, lässt sich (13) nicht ohne weiteres nach v auflösen. Man hilft sich hier mit einer empirischen Formel, in der diese Parameter auf Grund von Erfahrungswerten berücksichtigt werden. Wie in (12) hängt der Durchfluss von der Wurzel aus der Druckdifferenz ab. Man nennt dieses Messverfahren das Differenzdruckverfahren.

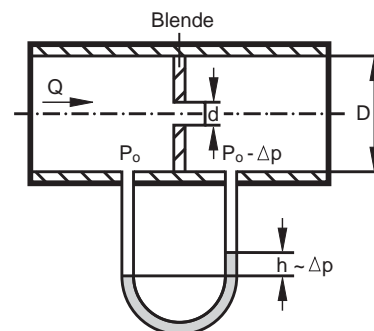


Abbildung 20: Messblende

Die empirische Formel für die Ermittlung des Volumenstroms aus dem Druckabfall an einer Blende lautet:

(15)

$$Q = 4000 \alpha \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

Q [m³/h]: Volumenstrom, Durchfluss; α : empirische Durchflusszahl; ε : Expansionszahl (bei Flüssigkeiten = 1); d [m]: Innendurchmesser der Blende; Δp [Pa]: Differenzdruck; ρ [kg/m³]: Dichte

Einheit	<p>Hier ist zu beachten, dass bei der Einheit des Volumenstroms oder des Durchflusses nicht die Sekunde sondern die Stunde als Einheit der Zeit gewählt wurde. In dieser Einheit wird z. B. auch die Förderleistung von Pumpen angegeben.</p> <p>Die Durchflusszahl α hängt von der Strömungsgeschwindigkeit, der Viskosität des Mediums und dem Rohrdurchmesser ab (DIN 1952).</p> <p>Das Differenzdruckverfahren wird in der Praxis häufig verwendet. Der Nachteil, dass an der Blende ein beträchtlicher Druckabfall und somit ein Energieverlust entsteht, er kann über 50 % betragen, wird dabei in Kauf genommen.</p>
Geschwindigkeit	<p>2.4.6 Zeitverhalten</p> <p>Zum Abschluss soll der zeitliche Aspekt kurz beleuchtet werden. Was geschieht, wenn z. B. bei der hydraulischen Presse ein Kolben blockiert ist, und die Kraft auf den anderen Kolben erhöht wird? Oben wurde gesagt, dass sich der Druck gleichmäßig im gesamten Medium ausbreitet. Geschieht das momentan oder wird dafür eine Zeit benötigt?</p> <p>Ein wichtiger Parameter ist in diesem Zusammenhang die Schallgeschwindigkeit im Medium. In Hydraulikanlagen werden häufig Zahnradpumpen zur Druckerzeugung verwendet. Da diese infolge der Zahnflanken nicht kontinuierlich arbeiten, erzeugen sie Druckpulsationen, die sich mit Schallgeschwindigkeit in der Hydraulikflüssigkeit ausbreiten. Um diese zu verringern werden Pulsationsdämpfer eingesetzt.</p> <p>Eine typische Drehzahl von Zahnradpumpen ist 1500 U / min. Das sind 25 U / s. Bei einem typischen Zahnrad mit 16 Zähnen ergibt sich eine Pulsationsfrequenz von 400 Hz. Damit ist man noch weit entfernt von der typischen Resonanzfrequenz von Keramikmembranen von 20-40 kHz. Keramik ein Werkstoff, der bei Drucksensoren verwendet wird (siehe Abschnitt 4.1.1)</p>
Stosswellen	<p>Bei sehr plötzlichen, energiereichen Druckänderungen, kann es sogar zur Bildung von Stosswellen kommen, die sich noch schneller ausbreiten, und bei denen beträchtliche Energien auftreten. Speziell bei der Hydraulik können dadurch indirekt weitere Druckspitzen erzeugt werden. Es lässt sich kaum vermeiden, dass sich Luftblasen in der Hydraulikflüssigkeit, das sind in der Regel spezielle Öle, bilden. Diese Luftblasen werden dann Gase enthalten, die aus Bestandteilen des Öls bestehen.</p>
Kavitation	<p>Bei der Entstehung solcher Blasen ist der Effekt der Kavitation beteiligt. Z. B. bei Pumpen oder bei starken Querschnittsänderungen kommt es zu starken Geschwindigkeitsänderungen und zu einem starken Druckabfall. Wenn die Geschwindigkeitspartikel diesen auf Grund der Trägheit nicht folgen können, oder wenn Unterdruck entsteht, bilden sich Vakuumblasen. Ein solcher Effekt ist z. B. auch bei Schiffsschrauben bekannt. Kavitation führt dazu, dass kleine und manchmal auch große Partikel von der Schraube abgelöst werden.</p> <p>Diese Blasen füllen sich in Hydrauliköl dann mit der darin gelösten Luft und mit Öldämpfen.</p>

Mikro-Diesel-Effekt

Wird nun ein solches Gas-Luft-Gemisch durch einen Druckstoß stark und plötzlich komprimiert, dann erhöht sich dessen Temperatur. Ist sie hoch genug, kann das zu einer Explosion wie im Dieselmotor kommen. Da hier nur winzige Bläschen beteiligt sind, spricht man hier vom Mikro-Diesel-Effekt. Dieser erzeugt also weitere Druckspitzen und Temperaturerhöhungen. Selbst wenn es nicht zu einer solchen Explosion kommt, dann werden solche Blasen aber, wenn sie wieder in Bereiche mit höherem Druck gelangen, plötzlich komprimiert, was auch zu Druckstößen führt. Wenn solch ein Vorgang in der Nähe der Rohrwandung geschieht, kann das dazu führen, dass die Wand erodiert, d. h. dass kleine Partikel von der Wand abplatzen, ähnlich wie bei Schiffsschrauben.

Druckspitzen

Die Konsequenz ist, dass beim Einsatz von Drucksensoren in der Hydraulik mit hohen stoßartigen Belastungen gerechnet werden muss (siehe auch die Stichworte Überlastung und Berstsicherheit im Lexikon). Diese Druckspitzen können bis zum zehnfachen des Messdrucks betragen. Sie sind aber sehr kurz, so dass dickere und schwerere (Keramik-)Membranen infolge ihrer Trägheit nicht so leicht zerstört werden. Sie sind besonders bei Piezo- oder Siliziummembranen problematisch (vgl. den Abschnitt "Druckmesstechnik").

2.5 Werte

Im Folgenden sollen einige Beispiele genannt und diskutiert werden.

Geräusche (80 dB): 10-1 Pa = 10⁻⁶ bar
 Luftdruck ca.: 105 Pa = 1000 hPa = 1 bar

Luftdruck

Der Luftdruck ist als Referenzdruck nur bedingt geeignet. Er ändert sich:

- je nach Wetterlage um einige Promille. Im Prozentbereich allerdings nur bei Orkanen.
- je nach der Höhe. Auf dem Gipfel des Mount Everest beträgt er nur noch ca. 1/3 des Normaldruckes.

Da der Normaldruck in der früher gebräuchlichen Einheit 10 mWS entspricht, wird es verständlich, dass Saugpumpen nicht über eine Höhe von 10 m fördern können.

Blutdruck (Arterie) 1,3 * 10⁴ Pa = 0,13 bar

Blutdruck

Bei einem stehenden Menschen wird dieser Druck in der Höhe des Herzens herrschen. Nimmt man an, dass sich der Kopf 0,4 m über und die Füße 1,3 m unter dem Herz befinden, wobei die Dichte des Blutes ca. 1,06 * 10³ kg m⁻³ beträgt, dann ergibt sich aus (3), dass der Druck im Hirn nur ca. 1/3 des Druckes in den Füßen beträgt.

Im Folgenden wird nur noch die in der Technik übliche Einheit 1 bar = 10⁵ Pa verwendet.

Wasserdruck (1 km Tiefe) 100 bar

Wasserdruck

Dieses Ergebnis lässt sich auch leicht aus der Aufstellung der Einheiten gewinnen, wenn man berücksichtigt, dass der normale (Luft-)Druck von 10⁵ Pa = 1 bar 10 mWS entspricht.

Dampfmaschine 200 bar

Druckgefäße 700 bar

Z. B. in der chemischen Industrie bei der Ammoniaksynthese.

Hochdruckpressen ca. $5 \cdot 10^4$ bar

Bei solchen Drücken wandelt sich Kohlenstoff in Diamant um. Größere Drücke lassen sich höchstens kurzzeitig erreichen (Explosionen).

Pneumatik ca. 6 bar

Hydraulik ca. 30 - 400 bar

Hierbei soll noch einmal kurz auf den Energieaspekt eingegangen werden.

Beispiel 10

Wie viel Energie enthält 1 l Hydraulikflüssigkeit bei einem Druck von 100 bar?

Die Antwort liefert (9):

$$W = \text{Druck} \cdot \text{Volumen} = 100 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 10^4 \text{ J.}$$

Mit dieser Energie könnte man 1 kg auf eine Höhe von 1000 m befördern. Es treten also in der Hydraulik beträchtliche Energien auf.

Dieses Beispiel ist idealisiert. Die Energie wird nicht so plötzlich frei werden und nicht verlustfrei umgesetzt werden können.

2.6 Relativ- und Absolutdruck

Druckarten

Diese Begriffe, die im Abschnitt 2.3 Druckarten, erläutert wurden, sollen hier noch einmal diskutiert werden. Wir nehmen an, wir haben ein geschlossenes System. Auf der einen Seite eines Kolbens herrscht der Systemdruck, auf der anderen Seite der Luftdruck.

1. Beide Drücke sind gleich

Der Kolben würde sich nicht bewegen. Wir haben Kräftegleichgewicht. Das ließe sich in der Praxis aber nicht ohne weiteres aufrechterhalten, weil der Luftdruck Schwankungen, je nach Wetterlage und Höhe, unterworfen ist. Um zu wissen, wie sich der Kolben verhalten wird, müsste man also sehr genau die Druckdifferenz zwischen Systemdruck und Luftdruck, also einen Differenzdruck, in diesem Fall den Überdruck, bestimmen. Eine Messung des absoluten Systemdrucks, also gegen Vakuum, allein wäre wenig sinnvoll.

2. Pneumatik

Hier liegt der Systemdruck bei 6 bar. Da der Luftdruck bei ca. 1 bar liegt, ist er also durchaus damit vergleichbar. Er beträgt immerhin etwa 17 % davon. Soll der oben beschriebene Kolben auf Normalhöhe verschoben werden, dann muss er gegen den Luftdruck von ca. 1 bar arbeiten. In 3000 m Höhe dagegen beträgt der Luftdruck nach der Tabelle Seite 16 nur noch ca. 0,7 bar. Demnach hat sich der Überdruck um 0,3 bar erhöht. Das sind immerhin 5 % des Systemdrucks. Auch hier ist also die Bestimmung des Überdrucks sinnvoll.

3: Hydraulik

Der Systemdruck liegt in der Größenordnung 100 bar. Der äußere Luftdruck liegt dagegen in der Größenordnung 1 bar. Selbst wenn sich dieser um 50 % ändern würde, dann würde diese Änderung, auf den Systemdruck bezogen, nur 1/2 % betragen. In diesem Falle ist es also praktisch gleich, ob man den Systemdruck absolut, also gegen Vakuum, oder als Überdruck, d. h. als Differenz zum Luftdruck bestimmt.

3 Druckmesstechnik

3.1 Übersicht

3.1.1 Sensor und Messgerät

Messgerät

Eine häufige Anforderung aus der Praxis besteht darin, dass nicht nur ein binäres Signal abgegeben werden soll, sondern dass der Druck auch gemessen und angezeigt werden soll.

Vergleich mit Strömungssensor

Ein Vergleich eines Drucksensors mit einem induktiven, kapazitiven oder Strömungssensor zeigt, dass diese Anforderung beim Drucksensor leichter zu erfüllen ist. Beim induktiven oder kapazitiven Sensor ist die Messgröße abhängig von Materialeigenschaften, wie Leitfähigkeit, chemische Zusammensetzung, Form usw. Erst recht gibt es beim Strömungssensor (siehe Schulungsunterlagen Strömungssensoren) eine Reihe von Parametern, die die Messgröße beeinflussen, z. B. beim kalorimetrischen Prinzip Viskosität, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit usw. Daher werden diese Sensoren mit Vorrang als binäre Signalgeber eingesetzt. Beim Drucksensor gibt es praktisch keine derartige Abhängigkeit.

nichtlinearer Zusammenhang
Störung durch Temperatur

Andererseits ist der Zusammenhang zwischen Messgröße und Messsignal nichtlinear, so dass hier eine mehr oder weniger aufwendige Umformung erforderlich ist. Dazu kommt, dass speziell die Temperatur eine Störgröße darstellt, deren Einfluss nicht immer leicht kompensierbar ist.

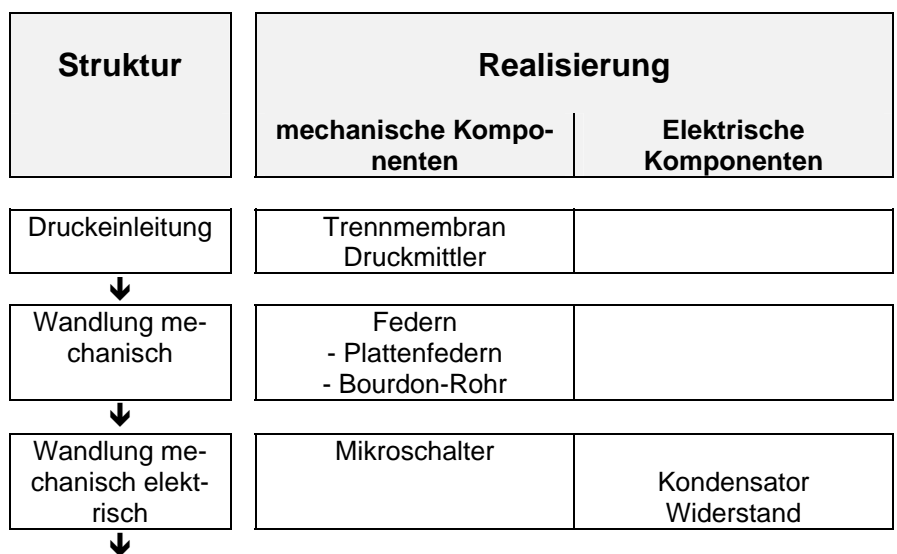
3.1.2 Diagramm

Was passiert bei der Druckmessung?

Das folgende Diagramm gibt einen Überblick über die Schritte, die zwischen dem Einwirken der Messgröße auf das Gerät und der Ausgabe des Messsignals liegen.

Bei den Schritten werden unter der Überschrift "Realisierung" in Stichworten, die unten erläutert werden, einige Bauteile, Zusammenhänge und Messprinzipien genannt.

Alle verwendeten Begriffe, wie Bourdon-Rohr, Plattenfeder usw. werden unten erklärt.



Signalerzeugung -aufbereitung		Kapazitätsdifferenz Wheatstone-Brücke
↓		
Signal- verarbeitung		digital (μ P) analog
↓		
Signalausgabe	mechanische Anzeige	Display (LCD, LED, 7-Segment-Anzeige LED-Balken) Schaltausgang (binär, analog)

Verformung

Die meisten Systeme arbeiten nach dem Prinzip, dass der Druck in eine Kraft umgesetzt wird, die ein Bauteil mechanisch verformt. Die gebräuchlichsten dieser Bauteile werden weiter unten beschrieben.

mechanisch

Beim mechanischen Gerät wird diese Verformung benutzt, um einen Kontakt zu schließen oder einen Zeiger zu bewegen.

elektrisch

Beim elektrischen Gerät wird die Verformung in ein elektrisches Signal umgesetzt. Dabei gibt es viele Methoden. Die wichtigsten werden hier beschrieben. Einige weitere sind im Anhang, im kleinen technischen Lexikon, zu finden.

3.1.3 Normung

An dieser Stelle soll nicht die komplette Norm DIN 16 086 "Elektrische Druckmessgeräte" besprochen werden. Die einzelnen Begriffe, die in der Norm definiert sind, wurden oder werden im vorliegenden Text meist dort erläutert, wo sie im jeweiligen Zusammenhang von Bedeutung sind. Auch im Anhang, im kleinen technischen Lexikon, werden einige Begriffe, die in der Norm genannt werden, erklärt. Hier soll nur das in der Norm enthaltene allgemeine Schema gezeigt werden, das in ähnlicher Form beim induktiven oder kapazitiven Sensor bekannt ist. Dieses Schema muss sehr allgemein sein, weil es viele unterschiedliche Messprinzipien gibt.

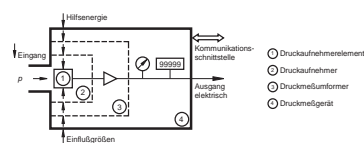


Abbildung 21: Norm Elektrische Druckmessgeräte

Aufnehmer

Z. B. ist die Unterteilung in Druckaufnehmer bzw. Druckaufnahmerelement nicht bei jedem Gerät ohne weiteres möglich. In der Praxis spricht man eher von einem "Sensor" statt von einem "Aufnehmer".

Um die einzelnen Komponenten besser in ihrer Zusammenwirkung zu verstehen, wird im folgenden Text nicht auf dieses Schema sondern auf das oben stehende Diagramm Bezug genommen.

3.2 Druckeinleitung und mechanische Wandlung

Kolbendruckschalter

Im Abschnitt "Physikalische Definition" (Seite 8) wurde schon kurz ein idealisiertes Druckmessgerät beschrieben (Kolben mit Feder). Dieses Prinzip wird in der Praxis aber nur bei Kolbendruckschaltern in der Hydraulik verwendet. In der Regel sitzt im Sensorkopf eine Membran oder eine Platte.

3.3 Membran

Trennmembran Diese Membranen haben den Zweck, das Medium vom eigentlichen Aufnehmer zu trennen. Das geschieht nicht allein wegen der Dichtigkeit, Vermeidung von Druckverlusten, sondern auch z. B. um den Aufnehmer vor aggressiven Medien zu schützen.

Bei den wenigen Geräten, die noch eine mechanische Kraftübertragung verwenden, wird die Kraft auf die Membran z. B. mit einer Stange auf eine Feder übertragen. Um Messfehler zu vermeiden, achtet man darauf, dass die Richtung dabei einen möglichst geringen Einfluss hat. Man spricht dann von "richtkraftloser" Übertragung. Solche Konstruktionen sind aber recht aufwendig und teuer. Im Einsatz können damit mechanische Probleme auftreten.

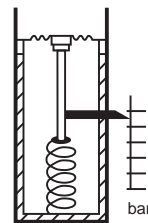


Abbildung 22: Trennmembran

federweich

Um die Membran allein zu verformen, wird allerdings auch schon eine Kraft benötigt, die das Messergebnis verfälscht. Speziell bei nichtlinearen Zusammenhängen lässt sich dieser Effekt schwer kompensieren. Man verwendet daher häufig Membranen, die leicht zu verformen sind. Man spricht dabei von "federweichen" Membranen. Man kann aber auch nicht z. B. die Membran beliebig dünn machen, weil sie dann leicht zerstört werden kann. Damit die Membran leicht ausweichen kann, ist ihre Oberfläche meist gewellt, siehe Abbildung 22. Es gibt auch Membranen in Form eines Balges.

3.3.1 Druckmittler

Der Druckmittler stellt einen Spezialfall der Trennmembran dar. Hier sind die Trennmembran und der Druckaufnehmer zu einem Teilsystem vereinigt. Wenn großer Wert darauf gelegt wird, das Medium zuverlässig vom Aufnehmer zu trennen, wird damit gearbeitet. Die Membran auf der einen Seite ist dem Medium ausgesetzt.

Zwischen der Membran und dem Aufnehmer befindet ein weiteres Medium, welches den Druck überträgt. Es handelt sich um eine federweiche Trennmembran. Dadurch werden die Effekte durch die thermische Ausdehnung des Mediums im Druckmittler verringert. Die Membran sollte dieser Ausdehnung ausweichen können, so dass sich dadurch der Druck nicht erhöht. Druckmittler sind als Zubehör erhältlich.

Sie werden besonders im Niederdruckbereich eingesetzt. Der mögliche Messfehler wird dadurch allerdings erhöht und die gesamte Messvorrichtung verteuert sich. Im Falle einer Beschädigung muss der komplette Druckmittler, also inklusive Druckaufnehmer, ausgetauscht und gegebenenfalls muss das Gerät neu justiert werden.

Speziell in der Lebensmittelindustrie kann es zu Problemen führen, wenn die äußere Membran beschädigt wird. Das Medium, das sich im Druckmittler befindet, kann dann austreten und das zu messende Medium verunreinigen. Man verwendet daher z. B. auch Olivenöl im Druckmittler.

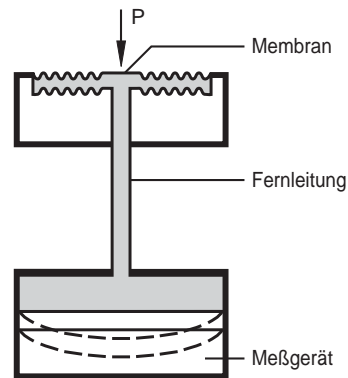


Abbildung 23: Druckmittler

Vorteile

- Trennung vom Medium
- Temperaturentkopplung vom Medium
- Sterilverbindung für die Lebensmittelindustrie, flachbündiger Einbau
- bessere chemische Resistenz gegen aggressive Medien
- Ex-Schutz: Flammendurchschlagssperre
- bessere Vibrationsfestigkeit
- geringere Empfindlichkeit der Membran gegen kristallisierende Medien

Nachteile

- Temperatureinfluss im Niederdruckbereich
- Preis

3.3.2 Plattenfeder

federelastisch

Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass die Membran selbst die Rolle der Feder übernimmt. Man spricht dann von einer "federelastischen" Membran oder einer Plattenfeder. Hier müssen, je nach Material, größere Ansprüche an die Fertigung und Montage gestellt werden. Falls nämlich dabei schon mechanische Spannungen auftreten, verfälschen diese das Messergebnis. Als Material wird meist Keramik, Silizium oder Metall verwendet. Die Eigenschaften dieser Materialien sind speziell unter dem Aspekt der Druckfestigkeit von Bedeutung, siehe 3.3.3.



Abbildung 24: Plattenfeder

Bezeichnungen

Wie oben erläutert wurde, werden Membranen mit unterschiedlichen Eigenschaften, nämlich federweich oder federelastisch, verwendet. In technischen Dokumentationen wird jedoch häufig nur der Begriff Membran verwendet, ohne ihn zusätzlich zu spezifizieren. Auch bei Abbildungen ist manchmal nicht auf den ersten Blick zu erkennen, um welche Membran es sich handelt. Das lässt sich nur aus dem Gesamtzusammenhang erschließen. Bei den modernen Geräten wird häufig eine Plattenfeder verwendet; sie wird aber als Membran bezeichnet. Da dieser Begriff gängig ist, wird er im weiteren Text auch verwendet. Wenn Geräte mit einer federweichen Membran beschrieben werden, dann wird diese als Trennmembran bezeichnet.

3.3.3 Druckfestigkeit

In beiden Fällen, (federweiche) Trennmembran oder elastische Membran (Plattenfeder), versucht man die Membran dadurch gegen Zerstörung bei Überlast zu schützen, dass man den Weg, die Verformung, möglichst klein hält. Man setzt z. B. dahinter eine stabile Wand, an die sich die Membran bei Überlastung, wie an einen Endanschlag, anlegen kann oder man versieht die Platte mit einer Vorspannung. Auch aus diesen Gründen ist es wichtig, zusätzliche mechanische Spannungen zu vermeiden.

Überlast

Der Begriff Überlast ist oben in einem allgemeinen Sinne verwendet worden. Die oben erwähnte Norm definiert aber den Begriff in einer speziellen Weise.

1	2	3	
Nenndruckbereich	zulässiger Überlastdruck		Berst- druck
Das Signal hängt eindeutig mit dem Druck zusammen	Das Signal liefert keine zuverlässigen Werte		
	Das Gerät erfährt keine bleibenden Veränderungen. Bei Rückkehr in den Nenndruckbereich arbeitet es wieder wie zuvor.	Das Gerät ist unbrauchbar	

Der Begriff Überlast hat hier also eine ähnliche Bedeutung wie „überlastfest“ bei der Endstufe eines Sensors. Er bedeutet, dass das Gerät zwar nicht mehr zuverlässig arbeitet aber nicht zerstört wird. Wird der zulässige Überlastdruck überschritten, dann kommt es zu bleibenden Veränderungen am Gerät. Bei weiterem Druckanstieg kann es zum Bersten des Geräts kommen. Das kann kritische Folgen für das System haben, z. B. Austritt des Mediums, Druckverlust usw. (siehe auch das kleine technische Lexikon im Anhang). Werte als Beispiele sind in 4.1.1 zu finden.

keine Missverständnisse!

Es ist nun aber ziemlich umständlich, jedes Mal vom Überschreiten des zulässigen Überlastdrucks zu sprechen, wenn das Verhalten des Geräts in dieser Grenzsituation beschrieben werden soll. Auch in diesem Text wird gelegentlich einfach von Überlast gesprochen im Sinne einer Belastung, der das Gerät nicht mehr widersteht. Es sollte aus dem Zusammenhang hervorgehen, was damit gemeint ist.

Material

Die verschiedenen Materialien unterscheiden sich durch ihr Verhalten bei Überlast. Bei Metallen tritt bei mechanischer Überlastung eine Phase des "Fließens" auf. Die Membran wird bleibend verformt. Das Gerät kann keine zuverlässigen Signale mehr liefern, bleibt aber dicht. Keramik hat auch bei sehr hohen Drücken sehr gute mechanische Eigenschaften. Wird aber die Grenze der Belastbarkeit überschritten, dann bricht die Membran wegen der Sprödigkeit des Materials (siehe auch die Begriffe "Berstsicherheit" und "Überlastung" im Lexikon). Bei dickeren keramischen Membranen hat man zwar eine höhere Druckfestigkeit, aber die zulässigen Biegeradien werden geringer. Auch bei dynamischen Belastungen, z. B. bei kurzen Druckspitzen (vgl. Mikro-Diesel-Effekt, in 2.4.6), ist die hohe Kurzzeitfestigkeit des Materials von Vorteil. Speziell bei Silizium ist hier die geringere Masse und damit die geringere Trägheit von Nachteil. Für den praktischen Einsatz sind diese Eigenschaften von großer Bedeutung.

3.3.4 Weitere Federformen

Bourdon-Rohr

In der Praxis werden nicht nur Federn wie in den Abbildungen mit dem Kolben, beim Kolbendruckschalter, verwendet sondern auch Spiralfedern wie z.B. in Uhren. Dadurch wird die Längenänderung direkt in die Drehbewegung eines Zeigers umgesetzt. Ein Spezialfall ist das Bourdon-Rohr. Es besteht aus einem gekrümmten Rohr. Wird es mit Druck beaufschlagt, dann verformt es sich derart, dass sich die Krümmung verringert, dass es sich also streckt.

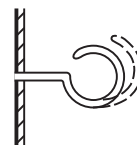


Abbildung 25: Bourdon-Rohr

Ein moderner Sensor soll ein elektrisches Signal liefern und nicht z. B. mechanisch einen Kontakt schließen. Auch bei den Geräten, die noch die Kraft mechanisch, über ein Gestänge, übertragen, wird letzten Endes eine mechanische Verformung ausgewertet. Dazu gibt es noch andere Federformen, z. B. Biegebalken. Dessen Deformation kann leicht in ein elektrisches Signal umgesetzt werden.

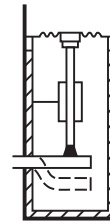


Abbildung 26: Biegebalken

Um eine bessere Linearität der Signale zu erreichen gibt es noch weitere Variationen, z. B. unterschiedliche Materialdicke (siehe auch Abbildung 32), ovale Querschnitte beim Bourdon-Rohr usw.

3.3.5 Messfehler

Temperatur

Die wesentlichen Ursachen für Messfehler sind Temperaturwechsel, weil diese durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten, zu mechanischen Spannungen führen können. Zusätzlich verändern sich natürlich auch elektrische Parameter, z. B. der Widerstand.

mechanische Spannungen

Daneben ist es wie erwähnt wichtig, dass sich bei Fertigung und Einbau des Sensors keine störenden mechanischen Spannungen ergeben können. Je aufwendiger die mechanische Konstruktion ist, z. B. Gestänge mit Hebeln zur Kraftübertragung, desto eher ergeben sich Fehlermöglichkeiten durch Lagerspiel, durch Verschleiß usw. Solche Geräte sind zudem teuer und haben nur noch einen geringen Marktanteil. Unter diesem Aspekt ist es optimal mit einer Membran in Form einer Plattenfeder zu arbeiten.

3.4 Mechanische Geräte

Hier entfallen natürlich einige Zwischenschritte im Diagramm bei 3.1.2. Die Kraft wird direkt auf einen (elektro)mechanischen Kontakt übertragen oder auf den Zeiger einer Anzeige. Es gibt Geräte, bei denen beides kombiniert ist.

3.4.1 Manometer und Druckschalter

Der Druckschalter liefert ein (elektrisches) Schaltsignal, wenn der eingestellte Grenzwert des Drucks über- bzw. unterschritten wird. Ein Manometer zeigt dagegen den aktuellen Druckwert an. Es gibt auch Geräte, bei denen beide Funktionen kombiniert sind.

Früher gab es nur mechanische Messgeräte mit einem Zeiger zur Druckanzeige (Manometer). Sie sind auch heute noch in beträchtlichen Stückzahlen im Einsatz. Speziell in Zusammenhang mit Grenzwertsignalgebern, Druckschaltern, sind sie mit den üblichen Problemen behaftet, die von mechanischen Geräten her bekannt sind (vgl. Schulungsunterlagen induktive Näherungsschalter). Es kommen hier auch Magnetspringkontakte oder Schlitzinitiatoren zum Einsatz, die in der Praxis auch Probleme bereiten können.

Messgerät

Um den Schaltpunkt korrekt einstellen zu können, ist häufig eine Anzeige des Druckwertes notwendig. Daher ist es auch heute noch so, dass herkömmliche Druckschalter meistens ein Manometer oder ein anderes Druckmessgerät sowie ein Ventil zur Einstellung des gewünschten Druckes erforderlich machen.

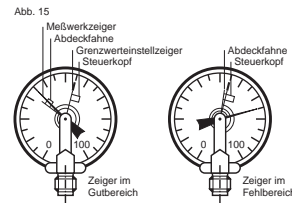


Abbildung 27: Manometer

Das verteuert entweder die Konstruktion einer Anlage, wenn zu jedem Druckschalter auch noch ein Manometer montiert werden muss, oder es verteuert die Wartung einer Anlage, weil im anderen Fall bei jeder Neueinstellung eines Schaltpunktes ein Manometer zuerst montiert und anschließend wieder demontiert werden muss.

3.4.2 Eigenschaften des mechanischen Druckschalters

Zur Übersicht sollen noch einmal die wesentlichen Eigenschaften, die meisten davon sind Nachteile im Vergleich zu elektronischen Geräten, zusammengefasst werden.

Vorspannung	Mechanische Druckschalter müssen in der Regel mit einer genau definierten Vorspannung der Kolbendichtung versehen werden. Durch Alterung des Materials verändert sich aber dieser Wert.
überlastfest	Mechanische Druckschalter besitzen meist eine hohe Überlastfestigkeit.
Anzeige	Bei den meisten mechanischen Druckschalerausführungen ist eine Anzeige des Systemdrucks nicht möglich. Viele Anwender benötigen aber diese Information, um ihre Anlage besser überwachen zu können. Man trifft daher häufig auf die Kombination eines Druckschalters mit einem Manometer. Durch das zusätzliche Manometer und den zusätzlichen Aufwand bei der Montage und bei der Wartung wegen zusätzlicher Dichtigkeitsprobleme wird der Preisvorteil des mechanischen Druckschalters wieder verringert.
Schaltpunkt	<p>Die Einstellung des Schaltpunktes ist beim mechanischen Druckschalter aufwendig. Wenn ein fest eingebautes Manometer vorhanden ist, dann hilft dieses bei der Einstellung des Schaltpunktes. Falls jedoch keines vorhanden ist, dann muss nur zu dem Zweck der Einstellung des Schaltpunktes ein Manometer zuerst montiert und anschließend wieder demontiert werden. Der Aufwand zur Justage ist also hier sehr hoch. Dazu kommt, dass die Anlage nur zur Einstellung des Schaltpunktes unter den vollen Systemdruck gesetzt werden muss, weil eine Einstellung allein an Hand der Skala des Geräts zu unzuverlässig ist. Zur Verdeutlichung: Ein mechanischer Druckschalter muss ausgetauscht werden. An seinem Einsatzort befindet sich kein Manometer. Folgender Vorgang läuft ab:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Die Anlage wird drucklos gefahren. 2. Der alte Schalter wird aus- und ein neuer eingebaut. 3. Zusätzlich wird ein Manometer montiert. 4. Der Druck wird hochgefahren. 5. Der Schaltpunkt wird eingestellt. 6. Die Anlage wird erneut drucklos gefahren 7. Das Manometer wird abmontiert. 8. Der Druck wird wieder hochgefahren.

Hysterese	Die Hystereseigenschaften des mechanischen Druckschalters sind schlecht. Die Hysterese streut je nach Druckbereich, von Gerät zu Gerät und in Abhängigkeit von der Temperatur. Sie lässt sich vor allem nicht ohne weiteres verstellen. Das hat für den Anwender u. a. einen höheren Aufwand bei der Lagerhaltung von Ersatzgeräten zur Folge. Er kann wegen der unterschiedlichen Hysterese nicht ohne weiteres z. B. ein Gerät mit einem Druckbereich bis 100 bar anstelle eines Gerätes mit dem Bereich bis 20 bar einsetzen.
Dichtigkeit	Die Dichtigkeit ist bei Kolbendruckschaltern auch problematisch. Speziell bei häufigeren Änderungen des Schaltpunktes und bei häufigen Überlastungen ist damit zu rechnen, dass Lecköl austritt.
Trägheit	Wie es auch von Positionsschaltern bekannt ist, haben mechanische Schalter eine erheblich größere Trägheit. Damit ist auch ihre Schaltfrequenz und schließlich damit auch die Taktzeit der ganzen Anlage begrenzt.
zähe Medien	Kolbendruckschalter können nicht bei zähen Medien (d. h. mit hoher Viskosität) eingesetzt werden.
Verschmutzung	Beim mechanischen Druckschalter ist, wie bei allen mechanisch beweglichen Teilen, die Verschmutzungsgefahr größer. In diesem Zusammenhang ist es auch von Nachteil, dass die Wege, die die beweglichen Teile zurücklegen müssen, um z. B. den Kontakt mechanisch zu schließen, erheblich größer sind als bei elektronischen Geräten. Auch der Einsatz von Mikroschaltern führt zu Problemen.
Kontakte	<p>Auch die Gefahr von Fehlschaltungen, zum Beispiel Nichtbetätigen des Kontaktes, ist hier erheblich höher als beim elektronischen Schalter. Außerdem ist beim mechanischen Schalter mit dem üblichen Kontaktprellen zu rechnen, was die Auswertung der Signale in elektronischen Geräten erschwert.</p> <p>Hier ließen sich noch weitere Punkte anführen, mit denen man auch z. B. bei induktiven oder kapazitiven Näherungsschaltern die Überlegenheit des elektronischen Schaltern gegenüber mechanischen Schaltern begründet, z. B. Korrosion der mechanischen Kontakte usw.</p> <p>Die wesentlichen Punkte, die am häufigsten von Anwendern genannt werden, sind:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. die schlechten Hystereseigenschaften 2. Kontaktprobleme, speziell aber nicht nur bei Mikroschaltern

3.5 Wandlung mechanisch elektrisch

3.5.1 Übersicht

Heute werden aber für die Automatisierungstechnik elektrische Signale benötigt. Der Druckaufnehmer, der Elementarsensor oder das Sensorelement, arbeitet noch mechanisch. Zur Wandlung in ein elektrisches Signal werden unterschiedliche Prinzipien verwendet. Es gibt hier keinen einheitlichen Trend, welches Prinzip verwendet wird, hängt vom Anwendungsfall ab. Kriterien sind: Druckbereiche, Genauigkeit, Überdruckfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Eichfähigkeit, Kalibrierung, Kosten usw. Am Ausgang der Geräte wird meist ein analoges Signal geliefert.

Die Sensorelemente werden von relativ wenigen Herstellern gefertigt. Diese liefern sie als OEM-Produkte (Original Equipment Manufacturer) an viele Hersteller von Druckmessgeräten.

Messgröße

Folgende physikalische Größen werden bei Druckmessgeräten häufig verwendet:

- Elektrischer Widerstand (bei metallischen oder piezoresistiven Dehnungsmessstreifen DMS),
- Induktivität
- Kapazität

und etwas seltener (siehe das technische Lexikon)

- Intensität einer Lichtstrahlung,
- Frequenz mechanischer Schwingungen,
- Piezoelektrizität oder
- Kraftkompensation.

Messmethode

Als Messmethode werden in der Regel Differenzmessungen eingesetzt:

- Wheatstone-Brücken,
- Differentialkondensatoren,
- Differentialtransformatoren.

Probleme

Typische Probleme, die bei den meisten verwendeten Methoden auftreten, resultieren daraus, dass sehr geringe Effekte, zum Beispiel sehr kleine Wege, erfasst werden müssen. Geringe Störeinflüsse können daher schon große Auswirkungen haben. An Störeinflüssen wurden schon genannt die mechanischen Spannungen, die sich bei der Fertigung oder beim Einbau ergeben und Temperatureffekte. Die Temperatur ist überhaupt der problematischste Punkt in der Druckmesstechnik. Temperatureffekte können sich auf zwei Wegen auf das Messergebnis auswirken: einmal indem durch unterschiedliche Temperaturen sich die elektrischen Parameter, zum Beispiel die elektrische Leitfähigkeit, ändern, oder indem sich durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten mechanische Spannungen durch Temperaturänderungen ergeben.

In den folgenden Abschnitten werden die am häufigsten verwendeten Typen erläutert. Selten verwendete Typen werden im technischen Lexikon beschrieben.

3.5.2 Dehnmessstreifen (DMS)

In den meisten Geräten werden DMS eingesetzt.

Funktionsprinzip

DMS werden auf einen elastischen Träger aufgebracht. Das kann zum Beispiel ein Biegebalken oder eine Plattenfeder sein. Der DMS muss mechanisch so verbunden sein, dass er dauerhaft den Bewegungen des Trägers folgen kann. Die mechanischen Eigenschaften ergeben sich aus denen des Trägermaterials. Weitere Eigenschaften ergeben sich aus der Verbindung DMS<->Träger. Besteht der Träger selbst aus elektrisch leitendem Material, dann muss der DMS elektrisch vom Träger isoliert werden. Als Trägermaterial wird verwendet: Metall, Keramik, Silizium und andere Kristalle.

Wie im ersten Kapitel besprochen wurde, wird der Druck über eine mechanische Verformung gemessen. Diese Verformung führt beim DMS zu einer Querschnittsänderung der Leiterbahnen und damit zu einer Änderung des elektrischen Widerstandes. Bei metallischen DMS wird der Effekt im Wesentlichen durch die Geometrie, das heißt durch die Veränderung der Abmessungen verursacht. Bei Halbleiter-DMS ergibt er sich durch die Veränderung der Kristallstruktur.

Dehnung → Verformung → Querschnittsänderung → Widerstandsänderung



Abbildung 28: DMS auf Biegebalken

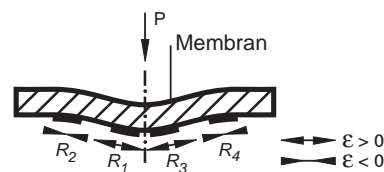


Abbildung 29: DMS auf Plattenfeder

Zusammenhang

Genauer gesagt ändert sich zunächst die Länge l eines Leiters um Δl . Da das Volumen gleich bleibt, ändert sich der Querschnitt und damit der Ohmsche Widerstand R um ΔR . Der Zusammenhang ist gegeben durch:

(16)
$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

k-Faktor

Die Änderung des elektrischen Widerstandes ist also proportional zur Längenänderung. Der Proportionalitätsfaktor k (engl. gauge factor) ist einmal abhängig von der Geometrie und andererseits von den Materialeigenschaften. Bei metallischen Leitern geht man von einem konstanten Wert von 2 aus, dagegen kann dieser Wert bei Halbleitern bis zu 100 betragen, ist aber nicht konstant.

Brückenschaltung

Die Auswertung geschieht über eine Brückenschaltung. Man bemüht sich dabei, möglichst gleiche Widerstände zu verwenden, damit Temperatureffekte kompensiert werden können. Man versucht die DMS so anzuordnen, dass bei einer Verformung zwei DMS gedehnt und zwei gestaucht werden. Um ein möglichst lineares Signal zu erhalten, sollten die Verformungen, also die Dehnungen und die Stauchungen, möglichst gleich ausfallen. Mit anderen Worten, eine exakte Geometrie ist Voraussetzung für exakte Signale. Das lässt sich aus der bekannten Formel für die Brückenspannung erkennen.

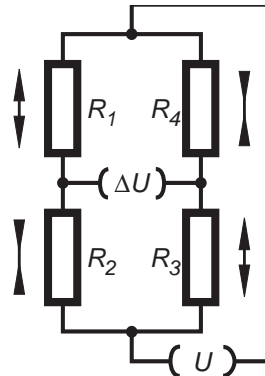


Abbildung 30: Brückenschaltung

Für die Brücke ergibt sich:

(17)
$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Mit (16) erhält man daraus:

(18)
$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{k}{4} \left(\frac{\Delta l_1}{l_1} - \frac{\Delta l_2}{l_2} + \frac{\Delta l_3}{l_3} - \frac{\Delta l_4}{l_4} \right)$$

Symmetrie

Man erkennt, dass man nur die gewünschte Proportionalität

(19)
$$\frac{\Delta U}{U} = k \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

erhält, wenn die Verformungen gleich sind.

Größenordnung

Nimmt man eine typische Verformung um den Faktor 10^{-3} an, und einen metallischen Leiter, wobei $k = 2$ ist, dann ergibt sich

$$\frac{\Delta U}{U} = 2 * 10^{-3}$$

also ein Signal von etwa 2 mV pro Volt. Das heißt zum Beispiel bei einer angelegten Spannung von 10 V hätten wir einen Signalthub von etwa 0 - 20 mV.

Die Darstellung der Brückenschaltung ist idealisiert. Es gibt Messgeräte mit vielen Widerständen, die z. B. auf einer runden Platte rosettenförmig angeordnet sind. Dadurch sollen u. a. Einflüsse der Geometrie, d. h. eine nicht gleichförmige Deformation der Platte kompensiert werden.

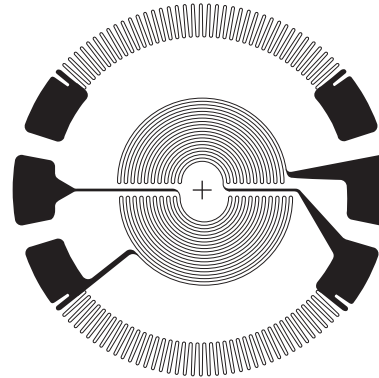


Abbildung 31: Widerstandsrosette

Es gibt auch Messgeräte, bei denen durch eine spezielle Form der Platte ein besser linearisiertes Signal erzeugt werden soll. Die Fertigung einer solchen Platte und der Abgleich für die Signalauswertung ist aber aufwendiger und teurer.

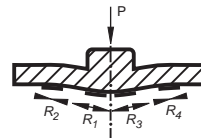


Abbildung 32: Spezielle Plattenfeder

U. a. bei Piezo-DMS findet man auch eine mäanderförmige Anordnung der Widerstände.

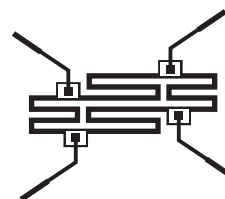


Abbildung 33: Mäanderförmiger DMS

Metallische DMS

Bei metallischen DMS ist die Messgröße, die in einer Größenordnung von $2 \cdot 10^{-3}$ liegt, etwa gleich groß wie die Störeffekte. Daher ist es hier auf jeden Fall erforderlich, eine Brückenschaltung zu verwenden, allein zum Beispiel zur Temperaturkompensation. Die erforderliche Genauigkeit beträgt damit etwa 10^{-6} und liegt damit recht hoch. Im Allgemeinen hat man jeweils zwei Widerstände, die gedehnt und zwei, die gestaucht werden. Das Signal, die Brückenspannung, ist dem Druck nur näherungsweise proportional. Durch spezielle Formen der Platte lässt sich das etwas verbessern, dafür ist deren Fertigung aufwendiger. Hier werden auch noch Biegebalken verwendet, auf die über eine Stange, die an einer federweichen Membran befestigt ist, der Druck übertragen wird.

Folien-DMS:

Diese bestehen aus gewalzter Folie mit einer Dicke der Größenordnung Mikrometer. Ihre Form erhalten sie zum Beispiel durch Ätzung. Als Material wird zum Beispiel Konstantan verwendet. Die Widerstände haben hier Werte von etwa 120 - 200 Ohm. Sie sind bis maximal 80°C, spezielle Typen bis 300°C einsetzbar.

Vorteile:

Obgleich DMS bei Wägezellen mit gutem Erfolg eingesetzt werden, kann bei Druckmessungen nur eine geringere Genauigkeit erzielt werden wegen der erheblich geringeren Abmessungen des Sensorelements.

Nachteile:

Die Genauigkeit wird bei kleineren Abmessungen und bei kleineren Drücken (unter 6 bar) schlechter. Werte unter 1 bar sind kaum noch zuverlässig zu erfassen. Der Temperaturbereich ist eingeschränkt. Das hängt u. a. damit zusammen, dass sie durch eine Klebung auf den Träger aufgebracht werden. Die Klebung unterliegt auch einer Alterung. Das führt zu einer schlechteren Langzeitstabilität. Die Geräte erfordern einen vergleichsweise hohen Prüfaufwand.

Dünnschicht-DMS

Sie werden mit Dünnschichttechnik gefertigt. Darunter versteht man zum Beispiel Aufdampfen, Aufputtern oder chemische Methoden. Die Materialdicke bei den Widerständen beträgt etwa 0,05 Mikrometer, bei den Leiterbahnen ca. 2 Mikrometer. Daraus ergeben sich Widerstandswerte von ca. 350 - 10 000 Ohm. Der Temperaturbereich lässt sich bis 170°C ausdehnen.

Vorteile:

Man benötigt nur geringe elektrische Energien. Es sind sehr kleine Abmessungen möglich. Der Temperaturbereich ist für viele Anwendungen ausreichend. Die Geräte besitzen eine hohe Langzeitstabilität. Das mechanische Verhalten bei Überlastung ist bei metallischen Membranen beim Einsatz in der Hydraulik gut.

Nachteile:

Die Fertigung ist aufwendig, das heißt, sehr teuer. Bei Druckbereichen unter 25 bar sind sie etwa viermal so teuer wie bei höheren Druckbereichen. Das kommt daher, dass hier der Durchmesser und damit die Fläche der Aufnehmer vergrößert werden muss. Werte unter 6 bar sind kaum noch zuverlässig zu erfassen.

Die EMV-Anfälligkeit ist höher. Wenn sie auf einen leitfähigen Träger aufgebracht werden, müssen sie von diesem durch eine isolierende Schicht getrennt werden. Da sie den Bewegungen, genauer den Verformungen, des Trägers ohne "Kriechen" gut folgen sollen, kann diese Schicht nicht sehr dick sein. Daher lässt sich nur eine geringe Durchschlagsfestigkeit erreichen.

Piezoresistive DMS

Halbleiter, sehr häufig wird hier Silizium verwendet, mit geeigneter Dotierung, sind besonders gut für Messungen geeignet. Ihre Resistivität ist abhängig von der Dehnung, bei Reinsilizium auch von der Richtung der Verformung. Sie werden meist auf Träger von reinem Silizium angebracht. Das Silizium wird in den meisten Fällen vom Medium getrennt. Man verwendet dazu zum Beispiel eine Flüssigkeitsvorlage und eine Trennmembran, oder zum Teil noch bei Biegebalken eine Membran mit einem Gestänge zur Kraftübertragung.

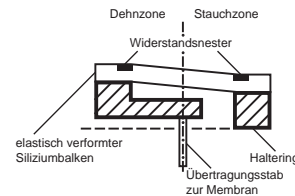


Abbildung 34: Piezoresistive DMS

Vorteile:

Silizium verfügt über ein gutes elastisches Verhalten. Die Hysterese ist gering und die Langzeitstabilität recht hoch. Mit einer gewissen Drift muss allerdings gerechnet werden. Kleine Messbereiche sind möglich. Die Geräte haben vergleichsweise kleine Abmessungen. Es lassen sich zum Beispiel Membranen von einem Durchmesser von nur 0,7 mm in Bereichen bis zu 350 mbar einsetzen. Der k-Faktor ist hoch, daher wird eine geringere Verstärkung benötigt. Die EMV-Verträglichkeit hängt vom Trägermaterial ab. Neben Silizium wird auch Metall oder Keramik verwendet. Problematisch sind in dieser Beziehung metallische Träger.

Nachteile:

Die Geräte sind wegen der geringen Membranmasse empfindlich gegen dynamische Überlastung. Es ist ein größerer Aufwand für Linearisierung und Temperaturkompensation notwendig.

Man unterscheidet:

- Piezo-Dünnschicht-DMS
- Piezo-Einkristall-DMS

Bei Piezo-Dünnschicht-DMS wird Polysilizium verwendet.

Diese Begriffe sollen hier kurz erklärt werden.

In vielen Fällen, zum Beispiel bei Verwendung von Silizium als Träger von integrierten Schaltungen, ist es erforderlich, Silizium als Einkristall vorliegen zu haben, weil die regelmäßige Kristallstruktur Bedingung für ganz genau eingehaltene Materialeigenschaften ist.

Es ist aufwendig, einen Einkristall herzustellen. Im Zusammenhang mit der Druckmessung ist diese Eigenschaft aber nicht erforderlich, sie ist im Gegenteil eher problematisch. Die Änderung einer Materialeigenschaft, zum Beispiel der Resistivität, bei einer Verformung hängt bei einem Einkristall unter anderem davon ab, in welcher Richtung die Verformung in Bezug auf die Richtung der Kristallachsen steht.

Geschieht nun die Verformung nicht immer auf genau dieselbe Weise, so wird man bei gleicher Kraft unterschiedliche Messergebnisse erhalten. Außerdem müsste das Aufbringen des DMS auf den Träger mit höchster Präzision erfolgen, weil sonst jedes Sensorelement sich anders verhalten würde und jeweils aufwendig abgeglichen werden müsste.

Bei der Fertigung von Polysilizium wird daher Wert darauf gelegt, dass es keine Vorzugsrichtung im Material gibt. Polysilizium ist also isotrop.

Piezo-Dünnschicht DMS

Piezo-Dünnschicht DMS werden ähnlich wie metallische DMS auf einen Träger aus Silizium aufgebracht. Da sie auch durch eine isolierende Schicht vom Träger getrennt werden, ist hier der Fertigungsaufwand hoch. Piezo-Einkristall-DMS bestehen aus einem Federkörper, Membran oder Balken, in den leitfähige Zonen eindotiert werden.

In Piezo-Dünnschicht-DMS hat isotropes Polysilizium Temperaturbereiche von maximal -30°C bis +200°C und ist auch langzeitstabil. Piezo-Einkristall-DMS haben einen Temperaturbereich von maximal -30°C bis +120°C.

Dickfilm-DMS

Dickfilm-DMS werden durch Siebdruck auf keramische oder metallische Membranen oder Biegebalken aufgebracht. Die Schichtdicke beträgt ca. 20 Mikrometer. Sie ist ca. 1000-mal dicker als Dünnschicht-DMS. Der k-Faktor beträgt hier 10 bis 50. Messgeräte mit diesem Material werden in Druckbereichen von 0,4 bis 200 bar eingesetzt.

Vorteil:

Die Fertigung ist billiger, d. h. die Geräte sind preisgünstig.

Nachteil:

Die alternde Dickschicht führt zu einer Langzeitdrift des Widerstandes. Die Temperaturkompensation ist aufwendig.

Temperaturgang

Bei den Messfehlern durch Temperatureffekte unterscheidet man zwei Arten:

1. Temperaturgang des Null-Signals

Das bedeutet eine Verschiebung des Bezugspunktes. Es handelt sich um einen absoluten Fehler. Er vergrößert sich also bei einer Verringerung des Messbereichs. Er wirkt sich am meisten bei kleinen Messwerten aus. Er wird in der Norm als thermische Änderung des Nullsignals (thermal zero shift) bezeichnet.

a) metallische DMS	
Einflussgrößen:	Größenordnung:
Genauigkeit des Brückenabgleichs lokale Temperaturunterschiede	min. 0,05 % für 10 K
Gegenmaßnahmen: Konstruktive Änderungen bei der Anordnung der DMS	

b) piezoresistive DMS	
Einflussgrößen:	Größenordnung:
diverse	min. 0,15 % für 10 K
Gegenmaßnahmen: Konstruktive Änderungen bei der Anordnung der DMS	

2. Temperaturgang des Signals

Das bedeutet eine Verfälschung des eigentlichen Messwertes. Hierbei handelt es sich um einen relativen Fehler. Er wird auch als Temperaturgang des Kennwertes oder, in der Norm, als thermische Änderung der Ausgangsspanne (thermal span shift) bezeichnet.

a) metallische DMS	
Einflussgrößen:	Größenordnung:
Temperaturgang des k-Faktors Temperaturgang des Elastizitätsmoduls Wärmeausdehnung des Trägers	einige 0,1 % für 10 K einige 0,1 % für 10 K einige 0,01 % für 10 K
Gegenmaßnahmen: Einfügen von temperaturabhängigen Widerständen in die Brückenspeisung. Diese reduzieren das mit zunehmender Temperatur anwachsende Ausgangssignal. Auswahl geeigneter Werkstoffe. Bei diesen kompensieren sich die Temperaturgänge des k-Faktors und des E-Moduls gegenseitig.	

b) piezoresistive DMS	
Einflussgrößen:	Größenordnung:
diverse	ca. 0,2 % für 10 K
Gegenmaßnahmen: Einfügen von temperaturabhängigen Widerständen in die Brückenspeisung. Diese reduzieren das mit zunehmender Temperatur anwachsende Ausgangssignal. Auswahl geeigneter Werkstoffe. Bei diesen kompensieren sich die Temperaturgänge des k-Faktors und des E-Moduls gegenseitig.	

Hier zeigt sich wieder, dass Temperatureffekte das größte Problem bei der Druckmessung darstellen. Ein scheinbar einfaches Messverfahren wie die Verwendung von DMS erfordert doch einigen Aufwand um zuverlässige Werte zu erhalten.

3.6 Kapazitive Sensoren

Kapazitive Druckmessgeräte werden häufig zur Differenzdruckmessung eingesetzt. Dabei kann der Temperatureinfluss gut kompensiert werden. Sie sind allerdings meist recht teuer.

Kondensator

Im Prinzip wird auf eine federelastische Membran und auf die gegenüberliegende feste Wand oder Gehäusefläche jeweils eine Elektrode aufgebracht. Diese Anordnung stellt einen Kondensator dar. Wird die Membran einem Druck ausgesetzt, dann verringert sich der Abstand der Elektroden, die Kapazität des Kondensators ändert sich dadurch. Der Raum zwischen den Elektroden kann mit einer Füllflüssigkeit oder mit Luft gefüllt sein.

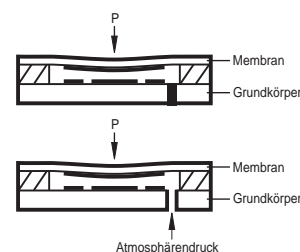


Abbildung 35: Querschnitt eines kapazitiven Sensors

Kapillarbohrung Die Abbildung zeigt eine solche Anordnung. Die Kapillarbohrung stellt die Verbindung zum atmosphärischen Druck dar. Es handelt sich beim unteren Gerät also um den Spezialfall einer Differenzdruckmessung, wobei der zweite Druck immer der Luftdruck ist.

Unterschiede in der Luftfeuchtigkeit können hier den Messwert beeinflussen. Speziell kondensierende Luftfeuchtigkeit kann ein Problem darstellen. Die innere Kammer ist ja in diesem Fall mit Luft gefüllt, die, nach einer gewissen Zeit, dieselbe Feuchtigkeit enthält wie die Luft in der Umgebung, falls das Eindringen der Feuchtigkeit nicht verhindert wird. Wenn sich die Vorrichtung abkühlt, kann diese Feuchtigkeit in Form von Wasser kondensieren. Da dadurch die Kapazität beeinflusst wird, kann es zu Verfälschungen des Messsignals kommen. Es gibt aufwendigere Konstruktionen, bei denen das Wasser sich an einem Ort sammeln kann, wo es die Messung nicht beeinträchtigt. Es werden auch PTFE-Sinterfilter in die Kapillaren gesetzt.

Referenzelektrode

Speziell bei einem Überdruck- oder Absolutdruck-Messsystem, wie in Abbildung 35 oben, werden mehrere Elektroden verwendet, zum Beispiel zwei scheibenförmige Elektroden als Messelektroden, und eine ringförmige Elektrode, die die Scheibe auf dem Träger umgibt, als Referenzelektrode.

Hier wird die Differenz zwischen der Kapazität des Kondensatorsystems (Scheibenförmige Elektrode auf der Membran ↔ Scheibenförmige Elektrode auf dem Träger) und (Scheibenförmige Elektrode auf der Membran ↔ Ringelektrode auf dem Träger) ausgewertet (vgl. die folgende Abbildung).

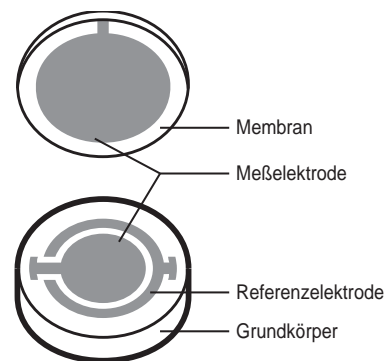


Abbildung 36: Offener kapazitiver Sensor

Die Referenzelektrode dient u. a. bei geschlossenen Systemen dazu, Temperatureffekte zu kompensieren. Speziell bei dem Typ, bei dem die innere Kammer abgeschlossen ist, dehnt sich die eingeschlossene Luft bei Erwärmung aus, was zu einer Vergrößerung des Plattenabstands führt. Weil dieser Effekt aber mit der Referenzelektrode gut zu kompensieren ist, stellt der kapazitive Absolutdruck-Sensor eine gute, insbesondere eine preiswerte, Alternative zum Differenzdrucksensor dar.

Kapazität

Der beschriebene Zusammenhang zwischen Kapazität und Plattenabstand soll nun in Formeln gefasst werden. Bekanntlich ist die Kapazität eines Kondensators umgekehrt proportional zum Plattenabstand.

(20)

$$C \propto \frac{1}{l}$$

Ändert sich der Abstand durch eine Deformation der Platte, die durch den Druck hervorgerufen wird, um einen kleinen Wert Δl , dann ändert sich die Kapazität um ΔC . Der Zusammenhang ergibt sich aus (20).

(21)
$$C + \Delta C = \frac{1}{l + \Delta l}$$

Aus (21) kann man schließen, dass sich beim invertierten Messsignal ein linearer Zusammenhang zwischen Δl und ΔC ergibt. Wenn auch noch Δl proportional zu Δp ist, dann besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Druckänderung und Messsignal. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Platte nicht zu stark deformiert wird, weil (20) nur für den Kondensator mit ebenen Platten gilt. Z. B. beim Kugelkondensator besteht ein anderer Zusammenhang.

Versionen

Speziell bei Differenzdruckmessungen werden häufig Systeme aus zwei gleichartigen Kondensatoren verwendet. Bei einer Druckänderung ändert sich deren Kapazität in unterschiedlichem Sinne, das heißt, wenn die Kapazität des einen Kondensators sich erhöht, erniedrigt sich die des anderen Kondensators (siehe die folgenden Abbildungen). Man spricht hier von einem Differentialkondensator. Wenn es eine Membran im Inneren und zwei Trennmembran nach außen gegen die Medien gibt, dann spricht man von der Zweikammerversion, wenn es dagegen nur zwei Membranen nach außen gibt, von der Einkammerversion

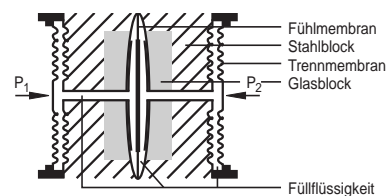


Abbildung 37: Zweikammerversion

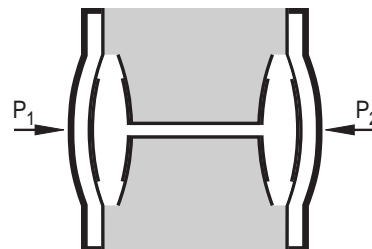


Abbildung 38: Einkammerversion

Der Temperatureinfluss lässt sich hier durch die Bestimmung der Summe beider Kapazitäten $C_1 + C_2$ leicht kompensieren. Diese Größe ist umgekehrt proportional zu einer Temperaturänderung.

Bei einer Spannungsmessung wird der Koeffizient

(22)
$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\Delta l}{l}$$

ausgewertet. Hier ist der Zusammenhang wieder linear. Bei einer Strommessung erhält man

(23)
$$C_1 - C_2 = \frac{\Delta l}{l} - \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^3 - \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^5 - \dots$$

Hier muss das Signal also noch zusätzlich aufbereitet werden.

Messweg	Der Messweg beträgt einige Mikrometer, bis ca. 30 Mikrometer. Bei Überlast dient die gegenüberliegende feste Gehäusefläche als mechanischer Endanschlag, an dieser Fläche kann sich die Membran abstützen. Bei komplizierter geformten Membranen muss bei der Fertigung mit großer Präzision gearbeitet werden, damit sich die Membran in passende Aussparungen in der Wand anlegen kann sonst würden unterschiedliche Geräte ganz unterschiedliche Signale liefern.
Differentialkondensatoren	Solche Geräte sind also entsprechend teuer. Bei Differentialkondensatoren ist die Wärmeausdehnung leicht zu kompensieren, da beide Kondensatoren in gleicher Art betroffen sind, beide Kapazitäten sinken um den gleichen Wert. Es gibt auch Messsysteme, die die Temperatur separat bestimmen und über die Temperaturmessung das Signal aufbereiten. Solche Geräte sind aber aufwendig und teuer.
Membran	Als Material für die Membran wird meist Keramik verwendet. Daneben kommt auch Saphir oder Silizium zur Verwendung.
Keramik	Keramik hat den Vorteil einer sehr guten chemischen Resistenz. Sie ist außerdem kurzzeitig stark belastbar. Üblicherweise wird sie in Druckbereichen bis 200 bar eingesetzt.

Problematisch bei keramischen Membranen sind thermische Spannungen, die sich durch zeitliche und räumliche Temperaturunterschiede oder fertigungsbedingt ergeben können. Sie können zu beträchtlichen Messfehlern führen. Eine Möglichkeit, diesem Problem entgegenzuwirken, besteht in der so genannten schwimmenden Lagerung. Die Membran ist dabei relativ frei beweglich, so dass keine mechanischen Spannungen auftreten können. Die Konstruktion ist aber sehr aufwendig und die Geräte sind sehr teuer. In diesem Fall werden zum Teil auch induktive Aufnehmer eingesetzt. Sie lassen sich einsetzen sowohl bei kleinen Drücken im Bereich von 0,5 bis 10 mbar, als auch bei höheren bis etwa 40 bar.

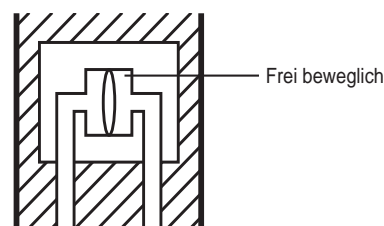


Abbildung 39: Schwimmende Lagerung

Ist der Aufnehmer einseitig offen, so ergibt sich eine Überdruckmessung. Teilweise werden solche Geräte in Bereichen bis 500 bar eingesetzt. Gängige Differenzdruckmessgeräte dieses Typs arbeiten in Druckbereichen bis zu 3 bar. Wenn auf der Innenseite Vakuum herrscht, dann werden die Geräte zur Absolutdruckmessung eingesetzt. In diesem Fall werden auch Tauchkondensatoren verwendet.

Kapazitive Sensoren enthalten also häufig Sensorelemente, auch Messzelle genannt, d. h. eine keramische Membran und eine feste Wand mit Elektroden, die durch keramische Prozesse miteinander verbunden und abgedichtet werden. Es gibt einige Hersteller, die sich auf die Fertigung davon, spezialisiert haben. Viele Hersteller von kapazitiven Druckmesssystemen verwenden die gleiche Messzelle. Unterschiede liegen im mechanischen Aufbau des gesamten Geräts und in der Signalaufbereitung. Teilweise werden auch baugleiche Geräte vertrieben.

3.7 Zusammenfassung

piezoresistiv	<p>Bezogen auf die Stückzahl ist der wohl am meisten verbreitete Typ der piezoresistive Sensor. Er kann sehr klein sein. Meist wird ein quadratischer Träger mit einer kreisförmigen Membran verwendet.</p> <p>Ein Nachteil liegt im häufig verwendeten Material Silizium. Dieser Punkt wurde oben schon besprochen. Die Membran ist hier sehr dünn. Sie hat dadurch wenig Masse und damit auch wenig Trägheit, dadurch schlechte Festigkeit gegen Druckspitzen.</p>
geklebte DMS	<p>Geklebte DMS sind hier aus verschiedenen Gründen noch ungünstiger. Einmal ist der Vorgang der Klebung recht aufwendig bei der Fertigung und andererseits weist eine Verbindung durch Klebung keine gute Langzeitstabilität auf.</p>
Dünnschicht	<p>Bei der Dünnschichttechnologie sind zwar im Vergleich zu früher die Preise schon etwas gesunken, sie bleibt aber doch noch relativ teuer.</p>
Dickschicht	<p>Dickschicht-DMS wird mit einem Siebdruckverfahren aufgedruckt. Wird hier zum Beispiel eine Stahlmembran verwendet, dann ist eine Isolationsschicht zwischen DMS und der Membran notwendig. Um das "Kriechen" möglichst klein zu halten, sollte die Isolationsschicht möglichst dünn sein, dadurch verringert sich allerdings ihre Durchschlagsfestigkeit. Außerdem altern Dickschichtwiderstände. Bei den verschiedenen verwendeten Materialien hat man ein Optimum zwischen den beiden Eigenschaften Stabilität und Größe des Messsignals zu finden. Entweder das Material ist stabil aber der Effekt ist gering, oder umgekehrt. Der Temperaturabgleich bei der Fertigung ist aufwendig. Wie oben beschrieben wurde, legt man Wert darauf, dass die Werte der einzelnen Widerstände, die bei der Verformung entweder gestaucht oder gedehnt werden, möglichst exakt übereinstimmen, um eine optimale Temperaturkompensation zu erreichen. Bei exakter Positionierung des DMS ist das Signal besser linear als beim kapazitiven Sensor.</p> <p>Dünnschichttechnologie ist dagegen deutlich besser in ihren Eigenschaften, aber wiederum erheblich aufwendiger.</p>
Ferrit	<p>Mit einem Ferritmaterial auf der Membran lässt sich das induktive Prinzip zur Signalaufnahme verwenden (siehe Abbildung 73). Es ermöglicht eine sehr hohe Auflösung in der Größenordnung Nanometer. Es ergeben sich allerdings Probleme durch die fertigungsbedingten Toleranzen im Ferrit und dadurch eine starke Temperaturabhängigkeit.</p>
Fazit	<p>Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der kapazitive Sensor mit einer keramischen Membran im Vergleich mit den anderen Typen recht günstige Eigenschaften aufweist. Speziell bei Anwendungen in der Hydraulik ist seine gute Resistenz gegen Druckspitzen zu nennen.</p>

4 Die ifm Drucksensor-Familie

Gliederung

Um das Lesen zu erleichtern soll kurz die Gliederung dieses Kapitels erläutert werden.

Die Geräte unterscheiden sich durch ihre Ausgänge, Bauformen, Displays usw. Zuerst werden Eigenschaften beschrieben, die alle gemeinsam haben.

Dann werde die beiden Typen, mit Balkenanzeige und mit numerischer Anzeige, etwas ausführlicher beschrieben. Im Normalbetrieb der Anlage ist die Anzeige interessant, für das Einrichten ist die Programmierung von Bedeutung. Sie werden daher beide beschrieben. Anschließend werden wichtige Eigenschaften aller Geräte in verschiedenen Tabellen zur Übersicht dargestellt.

4.1 Technik

In diesem Abschnitt soll das Funktionsprinzip und weitere Eigenschaften, die die meisten Typen gemeinsam haben, beschrieben werden.

4.1.1 Mechanische Wandlung

Membran

Eine keramische Plattenfeder (Membran) ist mit einer Glaslotschicht an einem keramischen Grundkörper fixiert. Der Abstand zwischen Membran und Grundkörper beträgt etwa 20 µm. Im Fall einer Überlast stützt sich die Membran am Grundkörper ab (siehe Abbildung 35, Abbildung 36 und Abbildung 41)

Überlast

Das Verhalten bei Überlast ist von großer praktischer Bedeutung. Dieser Begriff wurde in 3.3.3 genauer erläutert. Die Grafik zeigt Werte für die Drucksensor-Familie.

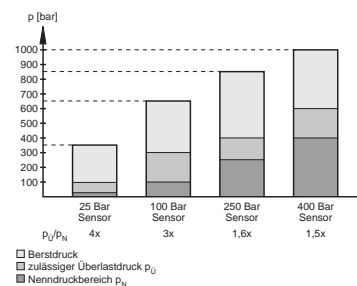


Abbildung 40: Überlastbereiche

keine Missverständnisse

Der Nenndruck kann sich in einem Bereich ändern, z. B. im Datenblatt angegeben ist die obere Grenze. Danach kommt der Bereich des zulässigen Überlastdrucks ebenfalls mit einer oberen Grenze. In dem Bereich darüber können irreversible Schäden eintreten. Über dessen Grenzwert muss mit dem Bersten der Membran gerechnet werden. Dieser Grenzwert heißt Berstdruck

Aus der Abbildung 40 erkennt man die Vorteile und die Grenzen des Materials. Der Bereich des zulässigen Überlastdrucks und erst recht der Berstdruck liegen um ein mehrfaches über dem maximalen Nenndruck. Das ist auch erforderlich, weil in der Praxis mit dem Auftreten von Druckspitzen gerechnet werden muss, vgl. 2.4.6. Allerdings wird das Verhältnis dieser Werte um so kleiner je höher der maximale Nenndruck wird. Das bedeutet, dass mit dieser Konstruktion keine höheren Nenndrücke als 400 bar erreicht werden können.

Druckausgleich

In Abschnitt 2.6 wurde an Beispielen dargestellt, dass Relativdruckmessungen speziell bei relativ geringen Druckwerten, bis ca. 25 bar, sinnvoll sind und dass darüber eine Absolutdruckmessung ausreicht. Die Messzellen der Drucksensoren sind daher bis zum Nenndruck 25 bar mit einer Öffnung für den Druckausgleich mit der Atmosphäre versehen (Abbildung 35 unten). Zur Einleitung des Luftdrucks hat auch das Gehäuse des Geräts eine Öffnung. Sie ist mit einem PTFE-Sinterfilter gegen das Eindringen von Feuchtigkeit geschützt (siehe auch 4.5.2). Bei den Geräten für höhere Druckbereiche ist die Messzelle geschlossen (Abbildung 35 oben).

Messzelle

Der Aufbau der Messzelle entspricht genau der Abbildung 35 oder Abbildung 36. Eine bessere Übersicht über die Größenverhältnisse bietet die Abbildung 41.

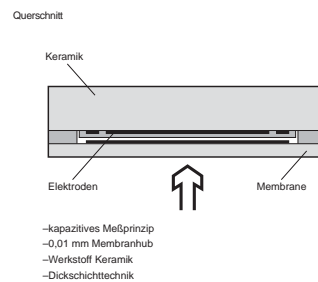


Abbildung 41: Messzelle der Sensoren

Druckeinleitung

Die Abbildung 42 zeigt die Druckeinleitung und den mechanischen Aufbau für Sensoren des Typs PA, PB und PN. Bei den Typen PF und PY kann man eigentlich nicht von Druckeinleitung sprechen, weil sie frontbündig sind. Hier ist die Membran dem Medium unmittelbar ausgesetzt. Um sie als frontbündig bezeichnen zu können, musste hier für die Dichtung eine spezielle Lösung gefunden werden. Weitere Eigenschaften sind in der Übersicht 4.5.2 zu finden.

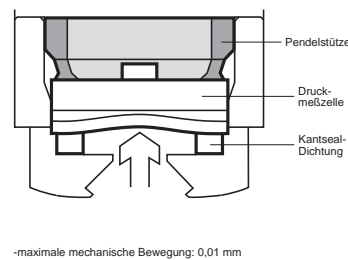


Abbildung 42: Mechanischer Aufbau

Beim mechanischen Aufbau müssen u. a. zwei Bedingungen erfüllt werden:

Dichtigkeit

Es muss verhindert werden, dass das druckführende Medium in das Gerät eindringt.

Stabilität

Die Messzelle darf nicht zu starr eingebaut werden, weil sie sonst leichter mechanisch zerstört werden kann.

Pendelstütze

Diese Bedingungen widersprechen sich teilweise. Es war also nicht einfach, sie beide gleichzeitig zu erfüllen. Die eingesetzte Dichtung erfüllt die erste Bedingung. Die patentierte Pendelstütze ermöglicht es der Messzelle, bei starker kurzzeitiger Belastung durch Überdruck, diesem auszuweichen. Dadurch wird die zweite Bedingung erfüllt.

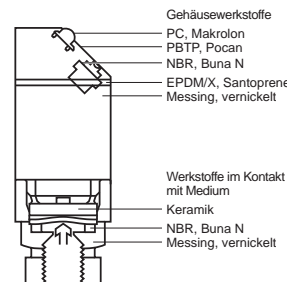


Abbildung 43: Werkstoffe

Die Abbildung 43 zeigt, dass nur wenige Werkstoffe in direktem Kontakt mit dem Medium stehen. Diese widerstehen vielen, auch aggressiven, Medien. Außerdem wird durch diesen Aufbau eine ausgezeichnete mechanische Stabilität, günstige EMV-Eigenschaften und eine hohe Schutzart erreicht (siehe auch Abbildung 45).

!

Hier hat sich schon früh eine Änderung ergeben. Diese Aussagen treffen nur für ältere Geräte zu. Bei den Geräten, ab ca. Anfang 1997, besteht das Metallgehäuse nicht mehr aus vernickeltem Messing sondern aus V2A. Damit wird eine noch bessere Widerstandsfähigkeit gegen unterschiedliche Medien erreicht.

Aus dem mechanischen Aufbau und dem Werkstoff Keramik ergeben sich folgende Eigenschaften:

Vorteile:

- Hohe Überlastfestigkeit, besonders im Niederdruckbereich
- Gute Verträglichkeit von dynamischen Druckspitzen
- Hohe Langzeitstabilität der mechanischen Eigenschaften
- Ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit
- Sehr gutes Temperaturverhalten

Nachteile:

- Maximaler Nenndruckbereich gleich 400 bar
- Bei hohen Nenndrücken geringere Überlastfestigkeit
- Berstverhalten - bei hohen Nenndrücken kleine Verhältnisse von Berstdruck zu maximalen Überlastdruck

4.1.2 Wandlung mechanisch elektrisch

Druckmesszelle

Die Druckmesszelle ist wie ein Plattenkondensator aufgebaut. Auf der Rückseite der Membran ist die Gegenelektrode, auf dem Grundkörper ist eine Ring- und Kreiselektrode aus Gold (Goldresinat - Dickschichtpaste) aufgebracht. Die Kreis- und die Gegenelektrode bilden das Messelektrodenpaar, die Ring- und die Gegenelektrode bilden das Referenzelektrodenpaar aus (siehe Abbildung 35, Abbildung 36 oder Abbildung 41).

Wird der Abstand zwischen dem Messelektrodenpaar verändert, so ändert sich die Kapazität.

Vorteile:

- Einfacher Aufbau
- Alterungsbeständige Dickschichtelektroden
- Hohe Durchschlagfestigkeit, daher Schutzklasse II (siehe Schulungsunterlagen Schutzarten) möglich
- Gutes Temperaturverhalten

Nachteile:

- Im Vergleich zum DMS-Verfahren geringere Linearität des primären Signals
- Relativdrucksensor muss mit Filter und Kapillarsystem aufgebaut werden, um ein Eindringen von Feuchtigkeit in den Elektrodenraum zu verhindern.

Temperaturverhalten

Durch das Messprinzip ist der Sensor vergleichsweise wenig anfällig für Messfehler durch Temperatureinflüsse, wie das folgende Beispiel, Abbildung 44, dokumentiert. Die Drift erscheint nur durch den Maßstab der Temperaturachse groß zu sein. Praktisch ist das ein sehr gutes Verhalten.

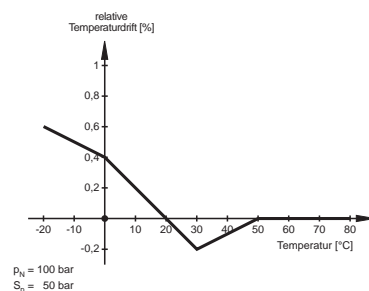


Abbildung 44: Relative Temperaturdrift

4.1.3 Signalerzeugung - primäre Elektronik

Der Plattenabstand des Kondensators wird mit einem Konstantstrom-Ladeverfahren ermittelt. Dabei wird der entladene Kondensator mit einer konstanten Stromquelle eine definierte Zeit geladen. Die Differenz der am Kondensator zu Beginn und am Ende des Ladevorganges anliegenden Spannung ist das Maß für den Abstand der Elektroden und somit für die Durchbiegung der Membran.

4.1.4 Signalverarbeitung

Signal

Die Grundkapazität der beiden scheibenförmigen Elektroden, der Messelektroden (vgl. Abbildung 36), beträgt ca. 30 - 40 pF. Die Referenzkapazität, d. h. die Kapazität des Systems scheibenförmige - ringförmige Elektrode (vgl. Abbildung 36) beträgt ca. 2 pF. Der Signalhub, das ist in diesem Fall die Änderung der Kapazität, die durch Druck hervorgerufen wird, beträgt ca. 8 pF.

Differenz

Um Störeinflüsse zu kompensieren und um das Verhältnis von Signal zu Hintergrund zu verbessern, wird die Differenz gebildet von den Spannungssignalen des Mess- und des Referenzelektrodenpaars. Das resultierende Signal wird von einem Mikroprozessor verarbeitet (außer PA).

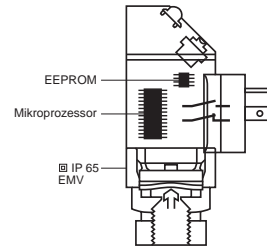


Abbildung 45: Mikroprozessor

Wandlung

Der A / D-Wandler des Mikroprozessors transformiert das Spannungssignal der Primärelektronik in einen digitalen Wert. Das nichtlineare Signal, vgl. 3.6 , wird vom Prozessor in eine nahezu lineare Ausgangsgröße umgerechnet.

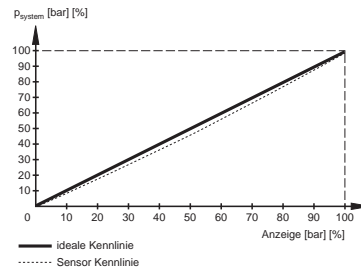


Abbildung 46: Kennlinienabweichung

Die Abbildung 46 zeigt, wie gering die Abweichung der Kennlinie des Sensors von der idealen (linearen) Kennlinie ist.

Im Fall des elektronischen Druckschalters wird dieser Istwert des Systemdrucks mit dem im EEPROM gespeicherten Sollwert verglichen, im gegebenen Fall wird ein Schaltsignal ausgelöst.

Zeitverhalten

In 2.4.6 wurde darauf hingewiesen, dass speziell in der Hydraulik mit Druckspitzen gerechnet werden muss. Wenn der Sensor auf jede kurzzeitig auftretende Druckspitze reagieren würde, dann gäbe es häufige Fehlschaltungen. Der Prozessor dämpft diese Spitzen durch Mittelwertbildung (Abbildung 47). Bei den Geräten mit numerischem Display (siehe 4.3.5) ist das Zeitverhalten programmierbar.

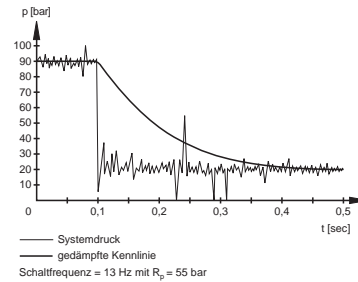


Abbildung 47: Dämpfung der Kennlinie

Mikroprozessor

Zusammengefasst übernimmt der Mikroprozessor folgende Aufgaben:

- Der μP startet und beendet die Ladezyklen
- Der μP steuert die Systemdruckanzeige an
- Der μP ermöglicht die skalierte Einstellung des Schaltpunktes mittels einer Drucktaste
- Der μP speichert die Eingabe im EEPROM
- Der μP bildet Mittelwerte
- Der μP führt Plausibilitätskontrollen durch

4.2 Geräte mit LED-Balken

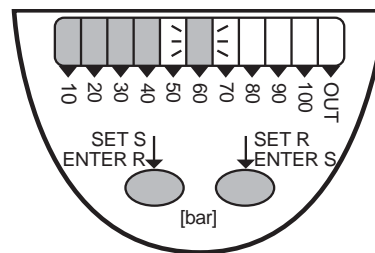


Abbildung 48: PB-Display Die Abbildung 48 zeigt das Display für diesen Typ. Der schräge Anschnitt des ansonsten zylindrischen Gehäuses trägt das Display. In Abbildung 53 ist es von der Seite gesehen dargestellt, Maßzeichnungen sind in 4.5.2 zu finden. Die Bedeutung der Tasten und der LEDs wird unten beschrieben.

Modus

Für die beiden Funktionen Anzeige und Einstellung verfügt der Sensor über zwei Betriebsarten: den Betriebsmodus (oder RUN-Modus) und den Einstellmodus (oder SET-Modus).

4.2.1 Anzeige

LEDs

Dieser elektronische Druckschalter ist mit 2 Drucktasten und 11 LEDs ausgestattet. Die gelbe LED dient zur Anzeige des Schaltzustands. Die 10 grünen LEDs haben mehrere Funktionen.

Normalbetrieb

a) Anzeige des Systemdrucks (kontinuierlich leuchtender LED-Balken) und des eingestellten Schaltpunktes (eine blinkende LED) im RUN / Betriebsmodus mit 10 % Auflösung.

Abbildung 49 zeigt zwei Beispiele. Bei beiden ist der Schaltpunkt auf 70 bar eingestellt. Im oberen Beispiel beträgt der Systemdruck 50 bar, der Ausgang hat nicht durchgeschaltet. Im unteren Beispiel liegt der Systemdruck bei 80 bar; er übersteigt somit den Schaltpunkt, der Ausgang hat durchgeschaltet.

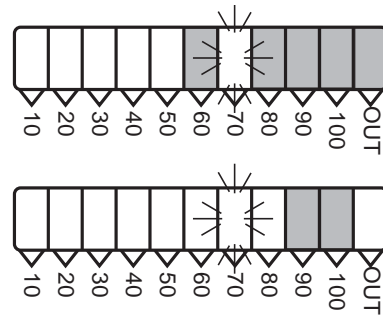


Abbildung 49: LED-Kette im RUN-Modus

Kontrolle

b) genaue Anzeige des eingestellten Schaltpunktes ("PRESET VALUE") mit 1% Auflösung, aktiviert durch kurzes Drücken der Set-Taste (kontinuierlich leuchtende LED = 10%-Schritte, blinkende LED = 1%-Schritte), siehe Abbildung 50. Diese Abbildung sieht genauso aus wie die vorangehende (abgesehen von der LED für den Schaltzustand). Die Bedeutung der LEDs hat sich aber geändert. Im oberen Beispiel ist der Schaltpunkt auf 57 bar, im unteren auf 87 bar eingestellt.

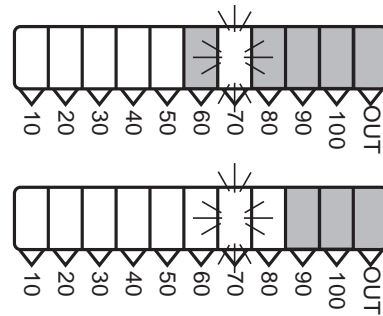


Abbildung 50: LED-Kette im SET-Modus

Störung

c) Störungsanzeigen für EEPROM-Fehler und Kurzschluss.

In der Abbildung 51 und Abbildung 52 werden Beispiele für die drei Möglichkeiten der Anzeige in einer Übersicht dargestellt (Normalbetrieb, Kontrolle und Störung) und zwar einmal bei einem 100 bar- und einem 25 bar-Sensor. Zur besseren Übersicht wurde die Darstellung etwas abgeändert, die LEDs werden hier als kleine Scheiben gezeichnet.

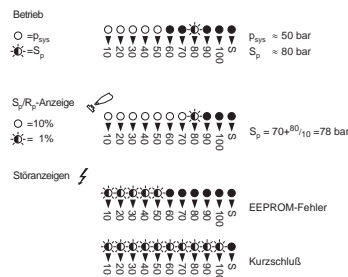


Abbildung 51: Anzeigen 100 bar

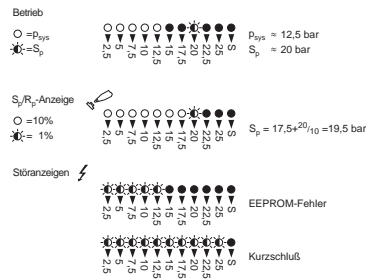


Abbildung 52: Anzeigen 25 bar

4.2.2 Einstellen des Schaltpunktes

Die Einstellung des Schaltpunktes erfolgt wie der Wechsel der Anzeige (siehe Abbildung 51) über Tasten.

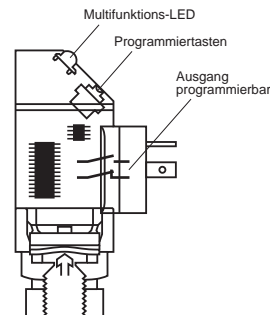


Abbildung 53: Anzeige und Tasten

Wird die Set-Taste länger als 5 Sekunden gedrückt, so springt der Mikroprozessor in den SET / Einstellmodus, der Schalterpunkt kann eingestellt werden. Dabei wandert der Wert in 1%-Schritten von 1 bis 100 % des maximalen Nenndruckes. Der jeweils aktuelle Wert wird wie bei der Anzeige des eingestellten Schalterpunktes dargestellt.

Zur optischen Orientierung wird für jeden vollzogenen 10%-Schritt eine kontinuierlich leuchtende LED gesetzt, das heißt, bei einem Sensor mit einem Nenndruckbereich bis 100 bar entsprechen im SET-Modus ein Balken von 5 kontinuierlich leuchtenden LEDs und eine blinkende LED an Position 7 einem Wert von 57 bar (siehe Abbildung 50, oberes Beispiel). Leuchten die LEDs von 1 bis 8 kontinuierlich und blinkt wieder die LED an Position 7, dann ist ein Wert von 87 bar eingestellt (siehe Abbildung 50, unteres Beispiel).

zu weit gegangen?

Was ist zu tun, wenn man zu lange gewartet hat, und der gewünschte Wert überschritten wurde? Es gibt keine Taste, die den Wert nach unten, zu kleineren Beträgen hin, verändert. Mehr Tasten hätten das Gerät nur komplizierter und teurer gemacht. Daher bleibt nur übrig abzuwarten, bis die Anzeige einmal ganz durchgelaufen ist. Wenn man beim maximalen Wert angekommen ist, dann beginnt es wieder mit dem minimalen Wert. Wie man leicht zum gewünschten Wert kommt, wird im nächsten Absatz beschrieben.

Tippbetrieb

Um einfach und sicher zum gewünschten Wert des Schaltpunkts zu kommen, ist auch ein Tippbetrieb möglich. Ist man erst einmal im SET-Modus, was daran zu erkennen ist, dass der Wert, dargestellt durch die LEDs in 1%-Schritten nach oben wandert, dann braucht die Set-Taste nur einmal kurz losgelassen zu werden. Jedes Antippen der Taste erhöht dann den Wert um 1%, solange man sich im SET-Modus befindet. Möchte man wie im Beispiel oben (siehe Abbildung 50) den Schaltpunkt auf 87 bar einstellen, dann lässt man den Schaltpunkt bis etwa 83 bar laufen (8 LEDs leuchten, die 3. blinkt) und lässt die Taste los. Anschließend tippt man die Taste noch ein paar Mal an, bis der genaue Wert eingestellt ist. Nicht vergessen: anschließend muss bestätigt werden (siehe unten).

Der eingestellte Schaltpunkt kann anschließend verriegelt werden. Der gesamte Ablauf ist in der Abbildung 54 noch einmal gezeigt. Mit dem Uhrensymbol werden Sekunden dargestellt.

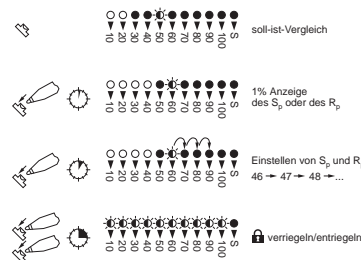


Abbildung 54: Einstellen und Verriegeln

Bestätigung

Zur Vereinfachung wurde bei der Einstellung des Schaltpunktes nur eine Taste dargestellt. Es ist die Taste mit der Bezeichnung Set S. Mit der Einstellung ist der Vorgang aber noch nicht abgeschlossen. Der neue Wert muss durch Betätigen der Taste Enter S bestätigt werden. Zu lange darf dabei nicht gewartet werden sonst geht das Display wieder in den Betriebsmodus über. Diese Funktion ist dann nützlich, wenn sich der Bediener z. B. unsicher über den einzustellenden Wert ist. Der Einstellvorgang kann also problemlos abgebrochen werden. Wenn die Enter Taste nicht betätigt wird, bleibt der vorher eingestellte Wert erhalten.

4.2.3 Hysterese

Zur Verdeutlichung wird die Hysterese an Hand eines Manometers dargestellt, Abbildung 55. Zu beachten ist, dass sie bei mechanischen Geräten nicht beliebig und genau eingestellt werden kann (siehe auch 4.7.3).

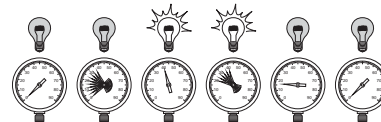


Abbildung 55: Darstellung der Hysterese

Die Hysterese ergibt sich als die Differenz zwischen Schaltpunkt SP und Rückschaltpunkt rP. Wie schon erwähnt ist es eine Besonderheit unseres Sensors und ein Vorteil speziell gegenüber dem mechanischen Druckschalter, dass die Hysterese in einem weiten Bereich einstellbar ist (mit einer Ausnahme, siehe 4.5.3).

Die minimale Hysterese beträgt 2 %. Da dieser Wert in der Größenordnung der Schaltpunktgenauigkeit liegt, wäre ein geringerer Wert auch nicht sinnvoll. Der Bereich der Hysterese hängt natürlich vom Schaltpunkt ab. Ist z. B. ein 10 bar-Sensor auf 50 % des Messbereichsendwerts (MEW) eingestellt, also auf 5,0 bar, dann kann die Hysterese maximal 47 % betragen, denn der minimale Wert des Rückschaltpunkts beträgt 0,3 bar (d. h. $5,0 \text{ bar} - 0,3 \text{ bar} = 4,7 \text{ bar} = 47 \% \text{ des MEW}$). Der Hysteresebereich ist in der Abbildung 56 dargestellt.

feste Hysterese

Um die Korrektur der eingegebenen Werte zu vereinfachen und um Fehleingaben zu vermeiden, bleibt der Wert der Hysterese bei einer Veränderung des Schaltpunktes erhalten. Wird also beim Beispiel oben ($SP = 5,0 \text{ bar}$, $rP = 0,3 \text{ bar}$, also Hysterese = 4,7 bar) der Schaltpunkt auf 5,5 bar geändert, dann ändert sich automatisch der Rückschaltpunkt auf 0,8 bar. Der Wert der Hysterese bleibt also bei 4,7 bar.

Anders verhält es sich in der umgekehrten Richtung. Wird wieder bei den gleichen Ausgangswerten ($SP = 5,0 \text{ bar}$, $rP = 0,3 \text{ bar}$, also Hysterese = 4,7 bar) der Schaltpunkt auf 4,5 bar geändert, dann bleibt der Rückschaltpunkt bei 0,3 bar, weil das schon der minimale Wert ist. Die Hysterese beträgt dann 42 % ($4,5 \text{ bar} - 0,3 \text{ bar} = 4,2 \text{ bar} = 42 \% \text{ des MEW}$).

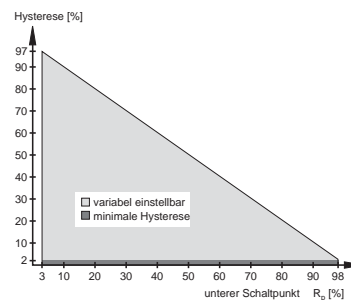


Abbildung 56: Hysteresebereich

In der folgenden Tabelle, Abbildung 57, sind Beispiele für einige Druckbereiche zusammengestellt.

	R_p		S_p		Hysterese	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
[%]	3	98	5	100	2	97
25 bar Sensor [bar]	0,75	24,5	1,25	25	0,5	24,25
100 bar Sensor [bar]	3	98	5	100	2	97
250 bar Sensor [bar]	7,5	245	12,5	250	5	242,5
400 bar Sensor [bar]	12	392	20	400	8	388

Abbildung 57: Beispiele für Hysterese

Rückschaltpunkt

Die Einstellung der Hysterese geschieht über die Einstellung des Rückschaltpunkts. Die beiden Tasten sind genau symmetrisch, der Ablauf ist derselbe wie beim Schaltpunkt (siehe 4.5.2). Der Schaltpunkt wird über Set S und Enter S, der Rückschaltpunkt über Set R und Enter R eingestellt. Die irrtümliche Einstellung des Rückschaltpunkts z. B. oberhalb des Schaltpunkts ist nicht möglich, weil dieser Bereich nicht zugänglich ist.

4.3 Geräte mit numerischem Display

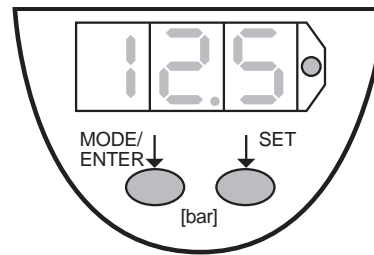


Abbildung 58: Numerisches Display

Es handelt sich um die Typen PF, PN, PY... Das Display befindet sich an der gleichen Stelle wie das LED-Display beim PB (siehe auch Abbildung 48). Die Bedeutung der Anzeige und der Tasten wird unten erläutert.

Modus

Auch diese Geräte verfügen die Betriebsarten RUN-Modus (Betriebsmodus) und SET-Modus (Einstellmodus). Wegen der vielen Einstellmöglichkeiten kann hier der zweite Fall auch als Programmiermodus bezeichnet werden. Durch das Display wird der Bediener sicher durch die Funktionen geleitet.

4.3.1 Anzeige

Dieser Typ ist mit einer dreistelligen 7-Segment-Anzeige und einer LED zur Anzeige des Schaltzustands ausgestattet (bei den Geräten mit zwei Schaltausgängen sind es 2 LEDs übereinander). Es gibt wieder drei Möglichkeiten, vgl. 4.2.1.

Normalbetrieb

a) Im RUN-Modus wird der Systemdruck mit 1 % Auflösung angezeigt. Je nach dem Druckbereich des Sensors wird auch der entsprechende Dezimalpunkt dargestellt.

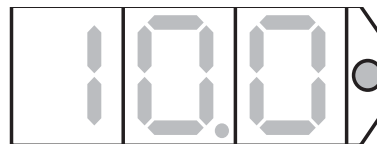


Abbildung 59: Anzeige im numerischen Display

In Abbildung 59 wird ein Druck von 10.0 bar (bei einem 10 bar- oder 25 bar-Sensor), in Abbildung 58 ein Druck von 12.5 bar (bei einem 25 bar-Sensor) angezeigt. Die LED zeigt den Schaltzustand an.

Kontrolle

Die Anzeige der eingestellten Werte mit 1 % Auflösung wird ähnlich wie bei den Geräten mit LED-Balken aktiviert (vgl. 4.2.1). Der Vorgang wird in 4.3.2 beschrieben.

Störung

Folgende Störanzeigen sind vorgesehen:

OL

OL als Anzeige für Überlast (engl.: overload)

Die Anzeige erscheint, wenn der Systemdruck 110 % des maximalen Nenndrucks übersteigt.

SC 1

als Anzeige für Kurzschluss (engl.: short circuit)

Sie bedeutet, dass am Schaltausgang 1 ein Kurzschluss aufgetreten ist, der Ausgang ist gesperrt. Bei Geräten mit zwei Schaltausgängen lautet die entsprechende Meldung SC 2.

4.3.2 Einstellen des Schaltpunktes

1. Mode

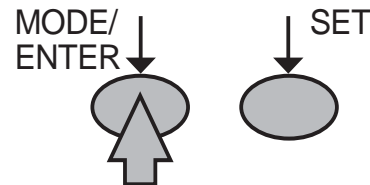


Abbildung 60: Schaltungspunkteinstellung 1 Die Mode-Taste wird betätigt. Mit dieser Taste kann man sich bei diesem Gerät durch eine Art Menü bewegen. Der Bediener wird durch das Display informiert, welcher Menüpunkt gerade aktuell ist. Die Taste ist so oft zu betätigen, bis im Display SP 1 für Schaltpunkt 1 erscheint. Die „1“ ist für Geräte mit zwei Ausgängen von Bedeutung. Dort wird über SP 2 der Schaltpunkt 2 eingestellt.

2. Set

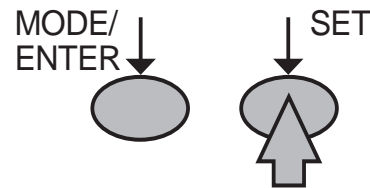


Abbildung 61: Schaltungspunkteinstellung 2

Dann wird die Set-Taste betätigt. Geschieht das nur kurzzeitig (antippen), dann wird wie beim PB der eingestellte Schaltpunkt mit 1 % Auflösung angezeigt. Soll dieser verändert werden, dann muss die Taste ca. 5 s festgehalten werden. Ebenfalls wie beim PB wird der Wert fortlaufend erhöht.

3. Enter

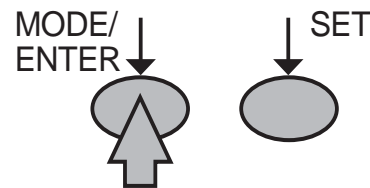


Abbildung 62: Schaltungspunkteinstellung 3

Wenn der gewünschte Wert des Schaltpunkts angezeigt wird, muss dieser wieder bestätigt werden. Das geschieht über die Enter-Taste. Wie in Abbildung 58 zu erkennen ist hat die linke Taste zwei Funktionen. In der Mode-Funktion ermöglicht sie das Umschalten zwischen verschiedenen Menüpunkten, in der Enter-Funktion dient sie zur Bestätigung des eingestellten Wertes. Nach der Betätigung der Taste wird der eingestellte Wert wirksam. Das Display zeigt noch einmal für ca. 5 s die ausgewählte Funktion, also hier SP 1. Dann geht das Gerät wieder in den Betriebsmodus (vgl. 4.3.1). Unterbleibt die Bestätigung, dann bleibt der vorher eingestellte Wert gültig. Das Gerät geht erst nach ca. 30 s wieder in den Betriebsmodus, damit man genug Zeit hat, die Einstellung zu überdenken.

4.3.3 Hysterese

Hier soll der Begriff Hysterese nicht noch einmal erläutert werden, das ist ausführlich in 4.2.3 geschehen. Der Unterschied zwischen PB und PN besteht im Wesentlichen in der Bedienung und der Anzeige. Die Werte bzw. Wertebereiche für Schalterpunkt, Rücksalterpunkt und somit Hysterese bleiben gleich. Auch hier bleibt der Wert der Hysterese fest (im Rahmen des zulässigen Bereichs), wenn der Schalterpunkt verändert wird.

rP 1	Die Einstellung des Rücksalterpunkts geschieht genau wie die Einstellung des Schalterpunkts in 4.3.2. Über die Mode-Taste muss dazu im Display die Anzeige rP 1 aufgerufen werden. Die „1“ ist wieder bei den Geräten mit zwei Schalterausgängen von Bedeutung. Dort wird der zweite Rücksalterpunkt über rP 2 eingestellt.
Hno, Hnc	Mit der Funktion Hysterese wird gleichzeitig die Ausgangsfunktion programmiert, Schließer (no: <u>n</u> ormally <u>o</u> pened) oder Öffner (nc: <u>n</u> ormally <u>c</u> losed).
1. Mode	Mode OU 1 Die Mode-Taste wird betätigt bis die Anzeige OU 1 im Display erscheint.
2. Set	Set Kno Nach dem Betätigen der Set-Taste erscheint Hno im Display. Wird die Taste nur kurz betätigt, dann wird die eingestellte Funktion, hier Hno, nur angezeigt. Nach 5 s wechselt die Anzeige zu OU 1. Nach weiteren 5 s geht das Gerät wieder in den Betriebsmodus. Soll die Funktion geändert werden, dann muss wieder die Set-Taste für ca. 5 s festgehalten werden. Die Anzeige wechselt dann von Hno auf Hnc. Mit dieser Einstellung würde der Ausgang gegenüber Hnc invertiert werden. Die weiteren Funktionen werden in 4.3.4 erläutert.
3. Enter	Enter OU 1 Über die Enter-Taste wird die Einstellung bestätigt. Der Menüpunkt OU 1 wird angezeigt. Nach ca. 5 s geht das Gerät wieder in den Betriebsmodus. Soll die Einstellung nicht verändert werden, dann kann entweder 5 s gewartet werden, bis das Display wieder OU 1 anzeigt oder, wie unter 3. beschrieben, der Wert mit der Mode-Taste noch ein Mal bestätigt werden. Wenn die Set-Taste betätigt wurde (über 5 s hinaus), z. B. um sich die verschiedenen Alternativen anzusehen, dann verlängert sich die Wartezeit auf ca. 30 s. Entsprechend geschieht die Einstellung bei den Geräten mit zwei Schalterausgängen über OU 2. Zur Funktion Hysterese gibt es bei diesem Typ eine Alternative, siehe 4.3.4.

4.3.4 Einstellung des Fensters

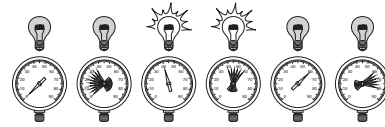


Abbildung 63: Darstellung des Fensters

Fno, Fnc

Die Fenster-Funktion ermöglicht es, mit dem Gerät z. B. einen Gut-Bereich zu überwachen. Bei der Einstellung Fno ist der Ausgang offen (0-Signal), wenn der Systemdruck unter dem Rückschaltpunkt oder über dem Schalt- punkt liegt. Der Ausgang ist geschlossen (1-Signal), wenn der System- druck zwischen Schalt- und Rückschaltpunkt liegt. Bei der Einstellung Fnc ist der Ausgang invertiert. Bei Einstellung der Fenster-Funktion ist die Hysterese auf den minimalen Wert, 2 % vom MEW, festgelegt (siehe auch 4.7.3).

Die Einstellung geschieht wie bei der Hysterese, siehe 4.3.3.

1. Mode

Mode OU 1

Die Mode-Taste wird betätigt bis die Anzeige OU 1 im Display erscheint.

2. Set

Set Fno

Nach dem Betätigen der Set-Taste erscheint z. B. zunächst Fno im Display. Wird die Taste nur kurz betätigt, dann wird die eingestellte Funktion, hier Fno, nur angezeigt. Nach 5 s wechselt die Anzeige zu OU 1. Nach weiteren 5 s geht das Gerät wieder in den Betriebsmodus. Soll die Funktion geändert werden, dann muss wieder die Set-Taste für ca. 5 s festgehalten werden. Die Anzeige wechselt dann von Hno auf Hnc und weiter auf Fno und schließlich Fnc. Wird die Taste weiter festgehalten oder angetippt, dann wiederholen sich die Anzeigen. Ist man schließlich bei der gewünschten Funktion, im Beispiel Fno, stehen geblieben, muss wieder bestätigt werden.

3. Enter

Enter OU 1

Über die Enter-Taste wird die Einstellung bestätigt. Der Menüpunkt OU 1 wird angezeigt. Nach ca. 5 s geht das Gerät wieder in den Betriebsmodus.

festes Fenster

Wie bei der Hysterese bleibt auch hier der Wert des Fensters fest bei Veränderung des Schaltpunktes. Das Beispiel für die Hysterese am Ende von 4.2.3 kann ganz genau so als Beispiel für das Fenster gelesen werden.

Entsprechend geschieht die Einstellung bei den Geräten mit zwei Schaltausgängen über OU 2.

4.3.5 Zeitverhalten

Zwei Parameter sind hier programmierbar.

1. Verzögerungszeit

dS 1, dr 1

Es handelt sich z. B. bei der Ausgangsfunktion Schließer um eine Einschaltverzögerung beim Schaltpunkt, bzw. um eine Ausschaltverzögerung beim Rückschaltpunkt. Damit können kurzzeitige Druckschwankungen ausgefiltert werden. Die „1“ lässt wieder erkennen, dass diese Werte bei den Geräten mit zwei Schaltausgängen separat eingestellt werden können und zwar unter dS 2 und dr 2.

Der Einstellbereich liegt zwischen 0 und 50 s.

Die Schritte sind: 0-0,2-0,4-...-10-11-...50.

Ist der Wert z. B. auf 10 s eingestellt, dann muss der Druck mindestens 10 s lang über, bzw. unter, dem Schaltpunkt liegen, damit der Ausgang schaltet.

Der Ablauf der Einstellung ist bei allen Funktionen gleich.

1. Mode Mode dS 1

Die Mode-Taste wird so oft betätigt bis im Display dS 1 erscheint (d für delay).

2. Set

Set 10.0

Durch Antippen der Set-Taste wird der eingestellte Wert angezeigt. Nachdem die Taste 5 s lang festgehalten wurde, beginnen die Werte im Display den Einstellbereich mit den angegebenen Schritten zu durchlaufen. Der gewünschte Wert ist im Tippbetrieb am sichersten zu treffen. Der eingestellte Wert, im Beispiel 10,0, muss wieder bestätigt werden.

3. Enter

Enter dS 1

Nachdem der Wert mit der Enter-Taste bestätigt wurde, erscheint im Display der aktive Menüpunkt. Durch weiteres Betätigen der Taste (in der Funktion Mode) gelangt man zu anderen Menüpunkten, oder man wartet 5 s bis das Gerät wieder in den Betriebsmodus geht

Die Einstellung von dS 2, dr 1, und dr 2 geschieht ganz genauso.

2. Dämpfung (Ansprechzeit, Anstiegszeit)

dAP

Im Gegensatz zur Verzögerung wird hier integriert über mehrere Messzyklen. Das heißt, es wird ein Mittelwert ermittelt. Dadurch werden kurzzeitige Oszillationen gedämpft. Das Gerät reagiert dadurch träger. Die Einstellung gilt bei Geräten mit zwei Schaltausgängen für beide.

Der Einstellbereich liegt zwischen 3 und 500 ms.

Die Schritte sind: 3-6-10-17-30-60-125-250-500.

Ist z. B. der Wert auf 125 ms eingestellt und steigt der Druck schlagartig von 10 auf 11 bar und bleibt dort, dann wird nach 125 ms der Wert 11 angezeigt. Steigt der Druck in der Zeit von 125 ms gleichmäßig von 10 auf 12 bar, dann erfolgt ebenfalls nach 125 ms die Anzeige 11. Man kann sich die Bedeutung der Dämpfung auch durch eine mechanische Analogie deutlich machen. Bei analogen Messgeräten, z. B. für Spannungsmessung, wird der Wert durch die Auslenkung eines Zeigers dargestellt. Durch die mechanische Trägheit und die mechanische Dämpfung, z. B. durch Reibung, der der Zeiger unterliegt, stellt sich der Zeiger nicht momentan auf jeden neuen Wert ein, der am Gerät anliegt. Man sagt auch hier, das Gerät reagiert träge auf Spannungsänderungen. Man kann das auch so ausdrücken: die Bewegung des Zeigers verläuft gedämpft. Während bei einem solchen Gerät die Dämpfung durch den mechanischen Aufbau festgelegt ist, kann sie beim Drucksensor eingestellt werden.

Der Ablauf der Einstellung folgt wieder dem üblichen Muster.

1. Mode

Mode dAP

Die Mode-Taste wird so oft betätigt bis im Display dAP erscheint (für damping).

2. Set

Set 125

Durch Antippen der Set-Taste wird der eingestellte Wert angezeigt. Nachdem die Taste 5 s lang festgehalten wurde, beginnen die Werte im Display den Einstellbereich mit den angegebenen Schritten zu durchlaufen. Der gewünschte Wert ist im Tippbetrieb am sichersten zu treffen. Der eingestellte Wert, im Beispiel 125, muss wieder bestätigt werden.

3. Enter











Enter dAP

















Nachdem der Wert mit der Enter-Taste bestätigt wurde, erscheint im Display der aktive Menüpunkt. Durch weiteres Betätigen der Taste (in der Funktion Mode) gelangt man zu anderen Menüpunkten, oder man wartet 5 s bis das Gerät wieder in den Betriebsmodus geht

4.3.6 Übersicht

Um die Übersicht über die vielfältigen Programmiermöglichkeiten zu erleichtern, werden die Funktionen noch einmal zusammengefasst.

Bedienung PN, PF...

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MODE/ ENTER 	11.0								MODE/ ENTER 
MODE/ ENTER 	SP1	) SET 	10.0	) SET  > 5 s	0.0	⇨	⇨	25.0	MODE/ ENTER 
MODE/ ENTER 	rP 1	) SET 	8.0	) SET  > 5 s	0.3	⇨	⇨	9.7	MODE/ ENTER 

	dS 1	)	0.0	) > 5 s	0.0	⇒	⇒	50.0	
	dr 1	)	4.4	) > 5 s	0.0	⇒	⇒	50.0	
	OU 1	)	kno	) > 5 s	kno	knc	Fno	Fnc	
	dAP	)	60	) > 5 s	3	⇒	⇒	500	

Erläuterungen

Der Wert 11.0 in Zeile 2 stellt ein Beispiel dar (alle Werte in bar). Die anderen Einträge in Spalte 2 sind die festgelegten Anzeigen, die den Bediener darüber informieren, welcher Menüpunkt gerade aktiv ist. Man gelangt von einem Punkt zum nächsten, indem die Mode Taste betätigt wird. Um die Tabelle nicht zu unübersichtlich zu machen, wurden die Menüpunkte SP 2, rP 2 usw., die sich auf das Gerät mit zwei Schaltausgängen beziehen, weggelassen.

Die Werte in Spalte 4 stellen ebenfalls Beispiele dar. Wenn z. B. nach dem Betätigen der Mode-Taste, die Anzeige SP 1 erscheint, dann wird nach Betätigen der Set-Taste der eingestellte Schaltpunkt 1, als Beispiel also 10.0, angezeigt. Der aktuelle Wert (11.0) liegt im Beispiel über dem Schaltpunkt, der Ausgang 1 müsste also schalten. Der Rückschaltpunkt 1 liegt im Beispiel bei 8.0. Die Verzögerung beim Rückschaltpunkt 1 (dr 1) wurde auf 4,4 s eingestellt. Die Ausgangsfunktion ist auf Hysterese und Schließer, die Dämpfung auf 60 ms eingestellt.

In den Spalten 7-9 wird der gesamte Wertebereich dargestellt, der einstellbar ist, wenn bei der Anzeige von Spalte 4 die Set-Taste länger als 5 s festgehalten wird. Natürlich würde in Zeile 3, bei SP 1, der Wert nicht bei 0.0 beginnen, sondern ab dem eingestellten Wert von 10.0. Würde man aber warten bis der gesamte Wertebereich durchlaufen ist, im Beispiel ist der maximale Wert 25.0, dann würde es wieder bei 0.0 beginnen. Die Werte in Zeile 4, beim Rückschaltpunkt 1 (rP 1), können aber nicht den gesamten Bereich durchlaufen. Der kleinste Wert ist durch die maximale Hysterese vorgegeben, der größte Wert durch die minimale Hysterese. Im Beispiel war ja der SP 1 auf 10.0 eingestellt. Die Schritte, in denen die Werte für die Verzögerung von Schaltpunkt, Rückschaltpunkt und Dämpfung durchlaufen werden, sind weiter oben angegeben.

Nicht vergessen!

Wurde ein Wert durch das Festhalten der Set-Taste verändert, dann muss er noch mit der Enter-Taste bestätigt werden sonst bleibt der vorher eingestellte Wert gültig.

Sie können die Programmierung auch selbst (in einer Simulation) in der virtuellen Produktbedienung bei der ifm im Internet ausprobieren.

4.4 Geräte ohne Display

wozu?

Von Anwendern kam der Wunsch, Geräte einsetzen zu können, die

- komfortabel programmierbar wie der PN, aber
- ohne Display ausgestattet sind.

Das ist z. B. dann sinnvoll, wenn es wegen des Einbauorts gar nicht möglich ist, das Display abzulesen. Interessant sind die Geräte natürlich auch, weil sie preisgünstiger sein können. Eine weitere Anforderung war, dass die Geräte einmal eingestellt werden sollten.

Diese Einstellung braucht dann in der Regel nicht mehr geändert zu werden. Ähnlich wie bei der Verriegelung sollten sie sogar gegen Veränderungen durch das Bedienungspersonal geschützt sein. Schließlich sollte auch häufig der gleiche Systemdruck mit den gleichen Parametern überwacht werden. Es war dann relativ aufwendig, alle Sensoren einzeln darauf einzustellen.

PP

Um diesen Anforderungen zu entsprechen, wurde der Typ PP entwickelt. Er bietet verschiedene Optionen

- Teach In
- Bedienen wie PN
- Einstellen per PC

Das Teach In wird hier kurz beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung ist bei ifm im Internet zu finden.

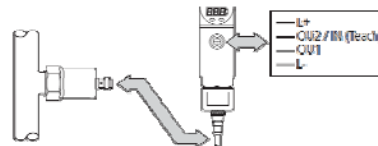


Abbildung 64: PP mit Programmiergerät PP 2000

Der eigentliche Vorgang ist in der nächsten Abbildung beschrieben.

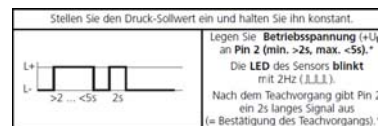


Abbildung 65: Teachen beim PP

Die Bedienung wie beim PN geschieht über ein Programmier- und Anzeigerät. Solche Geräte werden als Programmiersystem bezeichnet. Man kann es sich (etwas vereinfacht) so vorstellen, dass z. B. beim PN das Display mit den Tasten, also das hintere Teil des Gehäuses vom vorderen Teil mit dem eigentlichen Sensor abgetrennt ist. Die beiden Teile werden über ein Kabel verbunden. Die Einheit ist dann mit dem PN vergleichbar. Nach erfolgter Programmierung lässt sich der Parametersatz im Programmiergerät speichern. Man kann es nun abtrennen und mit einem weiteren Sensor vom Typ PP verbinden und in diesen den gleichen Parametersatz laden.

Die Anschlussschemata der anderen Geräte sind in 4.5.3 beschrieben. Hier folgt die Beschreibung des Anschlussschemas mit dem Programmiergerät PP2000.

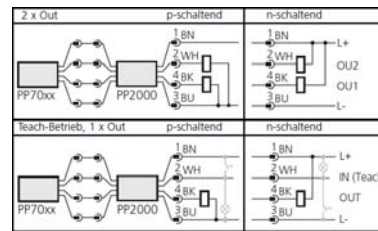


Abbildung 66: Anschlussschema PP mit Programmiergerät

4.5 Übersicht der Geräte

Bei dieser Übersicht handelt es sich um eine „Momentaufnahme“ (siehe Seite 2). Es ist zu beachten, dass die Familie weiter wächst, so dass damit gerechnet werden muss, dass manche Typen mit neuen Varianten (z. B. Nenndruck) oder auch neue Typen dazukommen. Bei Bedarf sollte der aktuelle Stand erfragt oder im Internet recherchiert werden.

4.5.1 Zusammenfassung

Die folgende Liste soll einen groben Überblick vermitteln. Weitere Eigenschaften werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

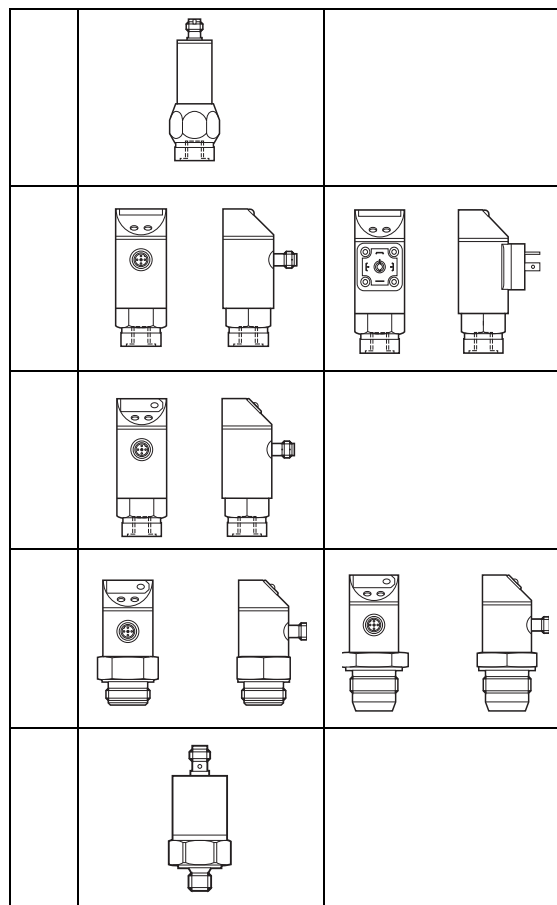
- | | |
|----|--|
| PA | Es handelt sich um einen Sensor mit einem Analogausgang ohne μ P, Anzeige und Programmiermöglichkeit (A steht für „analog“). Die Bauform ist schlanker und kompakter als bei den anderen Typen. |
| PB | Dieser Typ verfügt über eine LED-Balkenanzeige (B steht für „Balken“). Sie dient im Betriebsmodus zur Anzeige des Systemdrucks und des Schaltpunktes. Im Programmiermodus ermöglicht sie die genaue Einstellung des Schaltpunktes und des Rückschaltpunktes (Hysterese), bzw. der beiden Schaltpunkte über Tasten. Er besitzt einen oder zwei binäre Ausgänge. |
| PN | Der PN hat eine ganze Reihe von Programmiermöglichkeiten. Er ist mit einer dreistelligen LED-7-Segment-Anzeige ausgestattet (N steht für „numerisch“). Dazu kommt eine LED zur Anzeige des Schaltzustandes. Im Betriebsmodus wird auf der Anzeige der Systemdruck dargestellt. Im Programmiermodus werden die diversen Funktionen und die zugehörigen Werte angezeigt. Das sind im Einzelnen: <ul style="list-style-type: none"> • Schaltpunkt und Rückschaltpunkt (Hysterese), bzw. zwei Schaltpunkte • Ansprechzeit des Schaltausgangs • Verzögerungszeit • Ausgangsfunktion (Öffner oder Schließer) Es gibt diesen Typ mit einem oder zwei binären Ausgängen oder einem binären und einen analogen Ausgang (Kombi-Drucksensor). |
| PF | Dieser Sensortyp wurde für den Einsatz im Hygienebereich (Lebensmittelindustrie) oder bei pastösen oder feststoffhaltigen Medien entwickelt und ist ausgelegt für frontbündigen Einbau. er ist dann tottraumfrei (F steht für „frontbündig“). Er ist mit einer 7-Segment-Anzeige wie der PN ausgestattet. Er hat einen binären und einen analogen Ausgang (Kombi-Drucksensor). Er hat eine ähnliche Bauform wie der PB und PN, ist aber kürzer wegen des veränderten Prozessanschlusses. Es gibt zwei Varianten, die sich dadurch unterscheiden, dass der Prozessanschluss entweder über einen Adapter oder über einen Dichtkonus erfolgt. |

PY Diese Bezeichnung ist für Sondertypen vorgesehen. Der aktuell angebotene PY hat ähnliche Eigenschaften wie der PF. Er ist mit einem Gewinde ausgestattet und kommt zum Einsatz, wenn die Eigenschaft „totraumfrei“ nicht wesentlich ist. Wenn noch weitere Typen dazu kommen, dann könnten sie auch anders aussehen.

PP Sensor mit externer Programmierung oder teachen.

4.5.2 Mechanische Eigenschaften

Übersicht der Bauformen



PA Der PA hat, wie erwähnt, eine schlanke, kompakte Bauform.

PB Der PB ist in zwei Typen verfügbar, der erste hat einen Universalstecker, der zweite ist für den DIN-Stecker (C, Ventilstecker) ausgelegt. Es ist zurzeit das einzige Gerät der Familie mit diesem Stecker.

PB und PN Diese beiden Typen unterscheiden sich durch das Display. Der PB hat die Balken- und der PN die numerische Anzeige.

PF Die beiden Typen unterscheiden sich durch ihren Prozessanschluss, Adapter oder Dichtkonus.

PP Hier ist der Sensor ohne Programmiergerät dargestellt.

Maßzeichnungen

Die genauen Masse aller Typen sind im Katalog oder Internet zu finden. Hier sollen als Beispiele der PB mit DIN-Stecker, der PN und der PF mit Adapteranschluss vorgestellt werden.

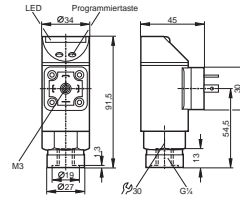


Abbildung 67: PB mit DIN-Stecker (Ventilstecker)

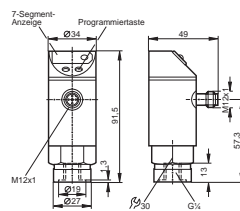


Abbildung 68: PN

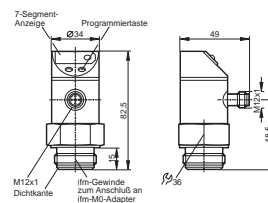


Abbildung 69: PF mit Adapteranschluss

Adapter

Der Adapter ist als Zubehör erhältlich.

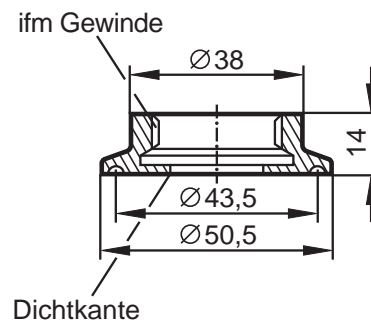


Abbildung 70: Adapter für PF

Empfohlene Einsatzbereiche

Die unterschiedlichen Bauformen resultieren aus unterschiedlichen Anforderungen an den Prozessanschluss.

PA, PB, PN	Pneumatik und Hydraulik
PF	Hygienebereich,

	pastöse und feststoffhaltige Medien
PY	pastöse und feststoffhaltige Medien

Totraum

Als Totraum wird der Bereich bezeichnet, der sich zwischen dem Gefäß oder der Leitung, die überwacht werden sollen, und dem Sensor befindet. Er ist auch mit dem druckführenden Medium gefüllt. Dieses nimmt hier aber nicht an Strömungsbewegungen teil. Bei Anwendungen in der Pneumatik und Hydraulik ist ein gewisser Totraum günstig, weil er zum Schutz des Sensors beiträgt. In der Lebensmittelindustrie dagegen ist ein Totraum nicht zulässig, weil er eventuell nicht vom Reinigungsmittel erfasst wird und dadurch das Einnisten von Bakterien begünstigt. Während es z. B. bei induktiven Sensoren eindeutig ist, was bündiger Einbau in eine ebene Fläche bedeutet, ist es dagegen bei Drucksensoren komplizierter. Einerseits werden diese in gekrümmte Rohr- oder Gefäßwandungen (mit unterschiedlichen Krümmungsradien) eingebaut bzw. angeflanscht, wodurch sich Stufen und Übergänge ergeben. Zum zweiten ergeben sich durch die Anbringung der Dichtung z. B. überstehende Kragen. Man versucht sie in ihren Abmessungen so klein wie möglich zu halten, sie lassen sich aber nicht völlig vermeiden. Auch beim PF und PY ist der Anschluss nicht exakt eben bündig. Es wurde aber eine spezielle Methode der Abdichtung entwickelt, die gute Dichtigkeit, mechanische Langzeitstabilität und chemische Beständigkeit gegen aggressive Medien verbindet, siehe Abbildung 71.

!

Es ist eine unfaire Argumentation, diese Dichtkante als Nachteil dieser Sensor-Familie darzustellen, weil praktisch alle verfügbaren Geräte ähnlich gebaut sind.

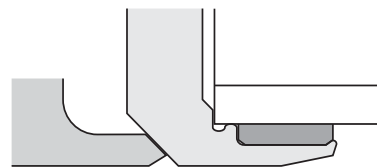


Abbildung 71: Prozessanschluss PF

Messbereiche

Der Messbereich ist durch die Dicke der Membran gegeben. Davon hängen auch der zulässige Überlastdruck und der Berstdruck ab.

Übersicht der Messbereiche

Messbereich	0...1	0...2,5	0...10	0...25	0...100	0...250	0...400
zulässiger Überlastdruck	10	20	50	100	300	400	600
Berstdruck (mindestens)	30	50	150	350	650	850	1000
Schutzklasse	IP 65	IP 65	IP 65	IP 65	IP 67	IP 67	IP 67
PA	•	•	•	•	•	•	•
PB	•	•	•	•	•	•	•
PN	•	•	•	•	•	•	•
PF	•	•	•	•			
PY			•				

Schutzklasse

Die Geräte ab Messbereichsendwert 100 bar haben eine geschlossene Messzelle. Die Geräte mit kleineren Messbereichen haben dagegen eine offene Messzelle. Das ist aus Gründen der Genauigkeit erforderlich (siehe 2.6 und 4.1.1). Diese Geräte müssen eine Öffnung für den Druckausgleich haben. Im Inneren der Messzelle herrscht also der äußere Luftdruck. Sie sind mit einem PTFE-Sinterfilter versehen, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern. Da im Prinzip jedoch Wasser eindringen könnte, haben sie eine andere Schutzklasse (siehe Schulungsunterlagen Schutzarten).

weiße Taste?

Das Filter ähnelt etwas in Form und Aussehen, nicht jedoch in der Farbe, es ist weiss, einer Programmier Taste. Das kann bei Anwendern zur Verwirrung führen.

Schaltzyklen

Die Anzahl der Schaltzyklen beträgt mindestens 100 Millionen.

wieso gerade so viele?

Diese Angabe sollte etwas ausführlicher erläutert werden. Ein Vorteil elektronischer Sensoren ist ihre verschleißfreie Funktion. Es wird z. B. beim induktiven Sensor darauf hingewiesen, dass die Lebensdauer nicht von der Anzahl der Schaltspiele abhängt. Haben wir somit einen Nachteil unseres Sensors gefunden? Nein! Es wurde schon beschrieben, dass bei fast allen Arten von Drucksensoren die Mechanik nicht völlig ausgeschlossen werden kann (vgl. 3.1). Speziell unter rauen Bedingungen (Stichwort: Druckspitzen in der Hydraulik) sind Drucksensoren gefährdet. Aber auch unter Normalbedingungen unterliegen viele Arten von Drucksensoren einer Alterung, was mindestens zu einer deutlichen Schaltpunktdrift führt (vgl. 3.5.2). Es ist nun aber gerade einer der Vorteile des Werkstoffes Keramik, dass er über eine hervorragende mechanische Langzeitstabilität verfügt. Der angegebene Wert ist also sehr gut und ist ein Argument, das dafür spricht, unseren Sensor einzusetzen. Er stellt eigentlich nur eine theoretische Grenze dar. Die Aussage „mindestens“ bedeutet, dass die Anzahl der Schaltzyklen in der Realität noch ein Vielfaches höher liegen kann. Eine so große Anzahl von Schaltzyklen wird in der Praxis niemals erreicht werden.

Temperatureinfluss

Er wird bei dieser Drucksensor-Familie in % des MEW bei einer Temperaturänderung von 10 K angegeben. Er beträgt $\pm 0,3$ im Temperaturbereich -25 bis +80° C.


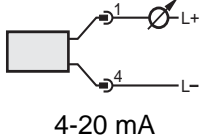

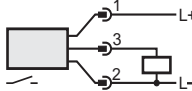
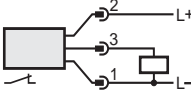
Wiederhol-/Schaltpunktgenauigkeit


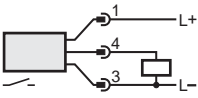
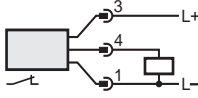

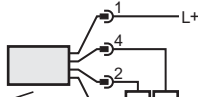
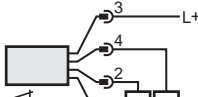

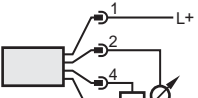
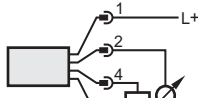
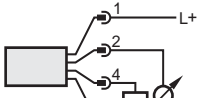

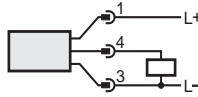
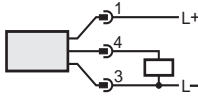

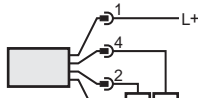
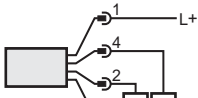


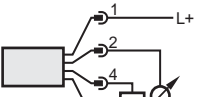
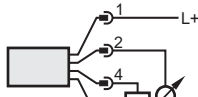
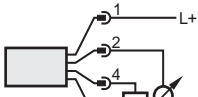

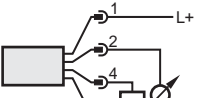
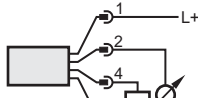
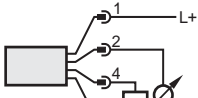
Diese Werte sind in % des MEW kleiner als:

$\pm 0,25$ und

$\pm 0,15$

Das ist eine gute Genauigkeit.

Anschlüsse		Analog	Schließer	Öffner
PA		 4-20 mA		
PB				

PB					
PB					
PN			 4-20 mA 0-10 V	 kno Fno	 knc Fnc
PN				 kno Fnc	 knc Fnc
PN				 kno Fno	 knc Fnc
PF			 4-20 mA	 kno Fno	 knc Fnc
PY			 0-10 V	 kno Fno	 knc Fnc

4.5.3 Elektrische Eigenschaften

PP

Das Anschlusschema für den PP ist in 4.4 zu finden.

Schaltfunktion

Die Programmierung der Schaltfunktion geschieht beim PB über die Anschlüsse, bei den anderen Typen, soweit möglich, über die Programmier-tasten mit Hilfe des Displays.

Analogausgang 4-20 mA

Mit Ausnahme des PA beträgt die maximale Bürde 500 Ω.
Beim PA wird sie berechnet nach der Formel:
(Betriebsspannung - 10,8) * 50

Bei einer Betriebsspannung von 24 V am PA ergibt sich z. B. eine maximale Bürde von 660 Ω .

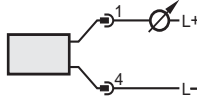
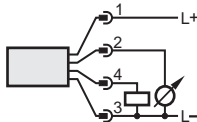
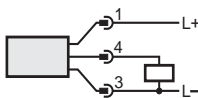
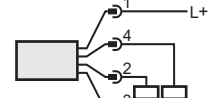
Analogausgang 0-10 V

minimale Last 2 k Ω .

antivalente Ausgänge

Beim PN mit zwei Schaltausgängen gibt es noch eine Besonderheit: Wird ein Schaltausgang auf H Π O, der andere auf H Π C programmiert, dann hat das Gerät antivalente Ausgänge bei sonst gleichen Einstellungen des Schaltpunkts.

Betriebsspannung
(einschließlich Restwelligkeit)

PA 	10,8 - 30 V DC
alle weiteren Geräte mit Analogausgang 	20 - 30 V DC
Geräte mit ausschließlich binären (Schalt-)Ausgängen z. B.  oder 	18 - 30 V DC

Strombelastbarkeit

250 mA. Diese Angabe betrifft die binären (Schalt-)Ausgänge.

Bereitschaftsverzögerungszeit

Das ist die Zeit, die zwischen dem Anlegen der Betriebsspannung und Ausgabe des richtigen Schaltsignals vergeht. Sie beträgt 0,2 s. Während dieser Zeit ist der Ausgang inaktiv.

PB mit zwei Ausgängen

Außer bei diesem Typ ist die Hysterese nicht einstellbar sondern auf 2 % des MEW eingestellt (vgl. 4.2.3).

4.6 Highlights

Zur besseren Übersicht sollen die vielen positiven Aspekte noch einmal kurz zusammengefasst werden.

- klein und kompakt, passt auch, wenn es eng ist
- deckt mit wenig Modellen einen großen Bereich ab
- leicht lesbare Anzeige, selten bei kompakten Drucksensoren
- Schaltpunkt einfach und präzise einstellbar
- Hysterese in weitem Bereich einfach und präzise einstellbar
- erweiterte Einstellmöglichkeiten beim PN, Hysterese und Zeitverzögerung für jeden Ausgang separat, Dämpfung
- kann gegen Manipulationen gesichert werden

4.7 Spezielle Applikationen

Dieses Kapitel stellt keinen Überblick über alle die vielfältigen Applikationen der unterschiedlichen Drucksensortypen dar, die oben erläutert wurden. Zuerst werden Applikationen im Bereich der Hydraulik vorgestellt. Dieses Feld, Hydraulik, lässt sich noch etwas genauer aufschlüsseln: Die Angaben sind nur als Richtwerte zu sehen, in Einzelfällen sind Abweichungen nach unten und oben möglich.

Im Laufe der Zeit werden weitere Applikationsbereiche ergänzt werden, wenn mehr Erfahrungen vorliegen, z. B. mit dem Bereich der Pneumatik oder im Hygienebereich.

Es folgt ein Beispiel für die vielfältigen Funktionen eines Drucksensors.

4.7.1 Mobiler Einsatz

Landwirtschaftliche Maschinen

150 - 200 bar
Bagger, Kräne 100 - 250 bar

4.7.2 Stationärer Einsatz

Kunststoffverarbeitung

Blasmaschinen 100 - 250 bar
Spritzgießmaschinen 150 - 320 bar

Hütten- und Walzwerksanlagen

Walzwerk 100 - 320 bar
Stranggießanlage 150 - 250 bar

Werkzeugmaschinen spanlos

Materialprüfpresen 320 - über 700 bar
Keramik-, Kunststoffpressen 260 - 320 bar
Abkant-, Ziehpressen 210 - 320 bar

Werkzeugmaschinen spanabhebend

Spannvorrichtungen 10 - über 600 bar
Hobel-, Stossmaschinen 60 - 120 bar
Bohr-, Drehmaschinen 30 - 70 bar
Schleifmaschinen 20 - 50 bar

4.7.3 Anwendungsbeispiel

was kann der Drucksensor?

In diesem Beispiel soll der Einsatz der verschiedenen Funktionen eines Sensors, z. B. PF mit zwei Ausgängen, erläutert werden. Damit soll deutlich gemacht werden, dass hier ein einziger Sensor ausreicht, um eine relativ komplexe Steuerungsaufgabe zu bewältigen.

Beschreibung

In einem Druckbehälter soll ein Druck von ca. 5 bar aufrechterhalten werden. Von Zeit zu Zeit soll aus dem Behälter ein Teil des Mediums abgeführt werden. Um die Skizze nicht zu unübersichtlich werden zu lassen, wurden die entsprechenden Leitungen, Ventile usw. weggelassen. Bei Druckabfall soll eine Pumpe eingeschaltet werden, um den Druck wieder zu erhöhen. Außerdem soll über eine Lampe angezeigt werden, ob sich der Druck im korrekten Bereich befindet. Die Werte der Schalt- und Rückschaltpunkte sowie der Schaltfunktionen sind in der Abbildung abzulesen. Im folgenden Zeitdiagramm ist ein möglicher Verlauf des Prozesses als Beispiel dargestellt.

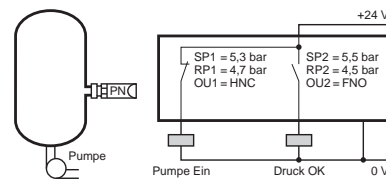


Abbildung 72: Anwendungsbeispiel

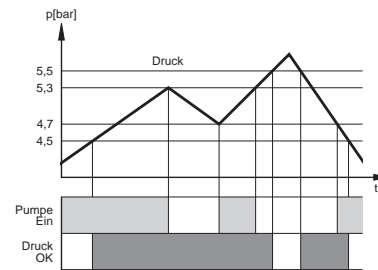


Abbildung 70: Zeitdiagramm

5 Kleines technisches Lexikon

Dieses Lexikon soll kein großes Nachschlagewerk werden; es soll dabei helfen, sich rasch über einige Grundbegriffe zu informieren. Dazu wird es in Zukunft noch ergänzt werden. Der aktuelle Stand ist also noch nicht endgültig. Anregungen darüber, welche Begriffe noch zusätzlich aufgenommen werden sollten, werden gerne entgegengenommen.

5.1 Spezielle Sensortypen

Induktive Sensoren

Das Funktionsprinzip bei induktiven Drucksensoren ist ähnlich wie bei kapazitiven. Hier werden metallische Membranen verwendet. Über zwei Spulen wird ein Differenztransformator gebildet. Es kommen hier auch Rohrfedern zum Einsatz

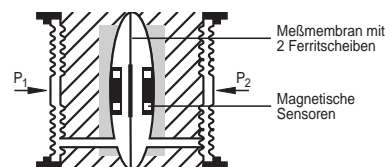


Abbildung 73: Induktive Drucksensoren

Optische Sensoren

Es gibt auch Druckmessgeräte, die über ein optisches System ihr Signal erzeugen. Dabei werden wieder Platten oder Rohrfedern verwendet. Die Auslenkung beeinflusst z. B. über eine Abdeckfahne die Lichtmenge, die auf einen Empfänger fällt. Daneben werden noch andere Prinzipien verwendet.

Piezoelektrizität

Damit wird der Effekt bezeichnet, dass manche Materialien ihre elektrischen Eigenschaften verändern, wenn sie unter mechanischen Spannungen stehen. Bei Druckmessgeräten wird hauptsächlich die Piezoresistivität ausgewertet, d. h. die Änderung des elektrischen Widerstands bei mechanischen Spannungen. Daneben wird z. B. in Feuerzeugen der Effekt ausgenutzt, dass durch mechanische Spannungen direkt beträchtliche elektrische Spannungen erzeugt werden können.

Pneumatische Messumformer

Bei pneumatischen Messumformern wird die Auslenkung einer Feder dadurch kompensiert, dass eine Platte mehr oder minder stark angeblasen wird. Das ist die Methode der Kraftkompensation. Neue Anlagen werden aber mit diesen früher verbreiteten Geräten nicht mehr ausgestattet, sie sind veraltet. Hier besteht höchstens noch ein gewisser Bedarf zur Nachrüstung.

Resonanzdrahtsensoren

Bei Resonanzdrahtsensoren wird von dem Effekt Gebrauch gemacht, dass die Resonanzfrequenz von der mechanischen Spannung abhängt. Solche Sensoren werden für Druck- und Differenzdruckmessungen eingesetzt in Bereichen von 70 mbar bis 420 bar.

Schwingquarz-Sensoren

Das gleiche Prinzip wird schließlich auch bei Schwingquarz-Sensoren angewendet. Diese sind einsetzbar in Druckbereichen von 0,1 bis 1400 bar. Die Langzeitstabilität ist besser als 0,01 % pro Jahr. Diese Geräte sind aber sehr teuer. Schwingensensoren aus Silizium arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie Resonanzdrahtsensoren, nur dass hierbei statt metallischen Drähten ein Schwinger aus Silizium verwendet wird.

5.2

absolute Genauigkeit

Begriffe

Damit wird beschrieben, wie der gemessene Wert von einer festen Referenz abweicht. Bei der vorgestellten Drucksensor-Familie fällt diese mit der Schaltpunktgenauigkeit zusammen.

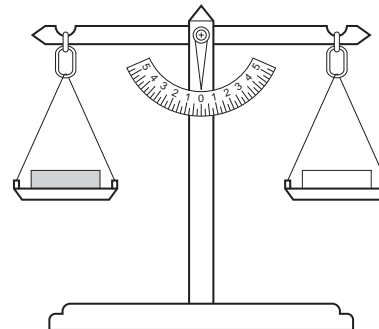


Abbildung 74: Absolute Genauigkeit

Im Beispiel, Abbildung 74, gibt es keine Abweichung.

Abweichungen von der Kennlinie

Die Kennlinienabweichung (Vergleiche DIN 16 086) ist die größte Abweichung der Kennlinie von einer festgelegten Kurve nach Messungen bei zunehmendem und abnehmendem Druck, also einschließlich Hysterese. In der Druckmesstechnik ist die festgelegte Kurve im Allgemeinen eine Gerade, es wird also von einem linearen Signalverlauf ausgegangen. Für die Kennlinienabweichung gibt es verschiedene Definitionen, die hier nicht ausführlich erläutert werden. Dafür muss auf die DIN 16 086 verwiesen werden. Die folgende Abbildung 75 verdeutlicht, was damit gemeint ist.

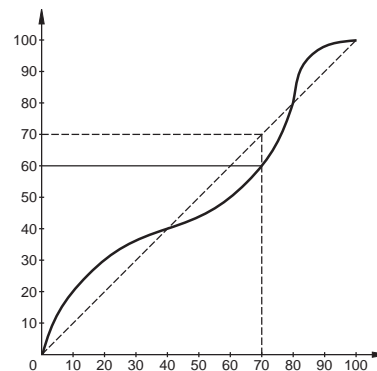


Abbildung 75: Abweichung von der Kennlinie

Auflösung

Damit wird der kleinste Schritt bezeichnet, bzw. die kleinste Änderung des Messwertes, die vom Gerät erfasst werden kann.

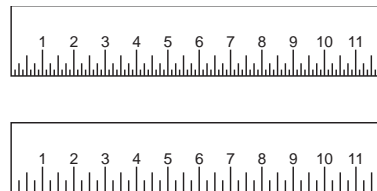


Abbildung 76: Auflösung

Die Abbildung 76 zeigt als Beispiel zwei Messstäbe mit unterschiedlicher Auflösung.

Berstdruck

Die Grenze des Überlastbereiches ist erreicht, wenn auch nur geringe bleibende Veränderungen der messtechnischen Eigenschaften des Sensors auftreten. Ein wichtiger Parameter ist hier der Berstdruck. Das ist der Druck, bei dem die drucktragenden Teile bersten, oder Messstoff austritt. Man spricht von Berstsicherheit oder secondary containment, wenn die Zerstörung des Messelementes keinen Druckverlust zur Folge hat.

Drift, Langzeitdrift

Ein weiterer wichtiger Parameter für Druckmessgeräte ist die (Langzeit-)Drift. Damit wird die maximale Änderung des Wertes eines Druckmessgerätes innerhalb eines definierten Zeitintervalls bezeichnet. Üblich sind Werte von etwa 0,1 bis 0,5 % pro Halbjahr.

Druckmittler

sind als Zubehör zu Drucksensoren erhältlich. Sie trennen das Messgerät vom Medium. Ihr Einsatz kann aus folgenden Gründen erforderlich sein:

Schutz des Geräts vor aggressiven Medien oder Medien, die ihre mechanischen Eigenschaften stark verändern, die z. B. erstarren oder kristallisieren

- Temperaturentkopplung
- Schutz vor Vibrationen
- Dämpfung von Druckschwankungen und Druckspitzen
- Notwendigkeit eines bündigen Einbaus, z. B. aus hygienischen Gründen in der Lebensmittelindustrie
- Schutz vor durchschlagenden Flammen (Ex-Bereich) oder Austritt toxischer Messstoffe

Druckmittler können allerdings das Messsystem erheblich verteuern. Ihre Kosten liegen zwischen 100 und 1000 €. Außerdem bilden sie eine zusätzliche Fehlerquelle

Es gibt Druckmittler für Druckbereiche von 10 mbar bis 1600 bar und Temperaturen von -90°C bis 400°C.

EMV

Die EMV war für viele Hersteller von Druckmessgeräten noch nicht aktuell, als die ersten Typen (PB) der neuen Familie vorgestellt wurden (1994). Heute ist aber die CE-Kennzeichnung vorgeschrieben (siehe Schulungsunterlagen CE-Kennzeichnung).

Grenzsignalgeber: Druckschalter

auch allgemeiner Grenzsignalgeber genannt, werden zurzeit noch relativ preiswert auf mechanischer Basis angeboten. Sie liegen zwischen ca. 21 bis 750 Euro. Sie werden häufig in Bereichen eingesetzt, wo Explosionsschutz wichtig ist. Je nach Einsatzgebiet benötigen sie also eine Zulassung nach ATEX (NAMUR), eine Zulassung für Brenngase usw. Hier werden auch häufig einfache DMS-Geräte eingesetzt für Druckbereiche zum Beispiel von 0 bis 10 bar oder von 0 bis 1 400 bar. Als Material für den Aufnehmer wird häufig Edelstahl verwendet. Ein gängiger Durchmesser beträgt 30 mm. Ex-Schutz oder Selbstüberwachung ist hier aber nicht selbstverständlich.

Messbereichsendwert

In den Unterlagen wird häufig die Abkürzung MEW verwendet. Wenn man sagt „10 bar-Sensor“, dann ist damit ein Sensor gemeint, bei dem der Messbereichsendwert 10 bar beträgt. Ein Beispiel aus der Längenmessung soll das verdeutlichen.

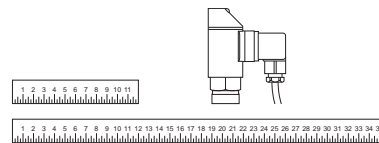


Abbildung 77: Messbereichsendwert MEW

Man hat hier zwei Messinstrumente (Messstäbe) mit gleicher Genauigkeit und gleicher Auflösung aber unterschiedlichem MEW. Genauso ist es beim Drucksensor zu sehen. Der MEW ist bei der vorgestellten Drucksensor-Familie durch die Dicke der Membran festgelegt.

Messbeständigkeit

Damit wird die Fähigkeit des Gerätes bezeichnet, seine Merkmale unverändert beizubehalten. Diese können sich zeitlich (Drift) oder durch andere Einflüsse (z. B. Temperatur) ändern.

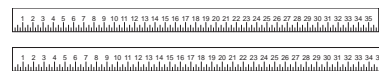


Abbildung 78: Messbeständigkeit

In Abbildung 78 ist als Beispiel dargestellt, wie sich bei einem Messstab die Länge durch Erwärmung ändert. Der Temperatureinfluss wird beim Drucksensor gesondert angegeben.

Preise

Druckaufnehmer gibt es ab ca. 175 bis 5 000 €. Die meisten liegen etwa zwischen 250 und 750 €. Differenzdruckaufnehmer liegen etwa zwischen 750 und 1500 €.

psi	<p>Diese Einheit, die z. B. in den USA benutzt wird, ist schon in Abschnitt 2.2 erwähnt worden. Hier sollen kurz einige weitere Bezeichnungen besprochen werden, die sich daraus ableiten (ähnlich wie früher das atü aus dem at).</p> <table border="0"> <tr> <td>psia</td> <td>pounds per square inch absolute</td> <td>Absolutdruck</td> </tr> <tr> <td>psis</td> <td>pounds per square inch standard</td> <td>Überdruck (bezogen auf festen Referenzdruck)</td> </tr> <tr> <td>psig</td> <td>pounds per square inch gauge</td> <td>Relativdruck</td> </tr> <tr> <td>psid</td> <td>pounds per square inch differential</td> <td>bidirektionaler Differenzdruck</td> </tr> </table> <p>Zu den deutschen Begriffen siehe auch die Tabelle „Druckarten“ weiter unten.</p> <p>Es ist eine unfaire Argumentation, dies als Nachteil dieser Sensor-Familie darzustellen, weil praktisch alle verfügbaren Geräte ähnlich gebaut sind.</p>	psia	pounds per square inch absolute	Absolutdruck	psis	pounds per square inch standard	Überdruck (bezogen auf festen Referenzdruck)	psig	pounds per square inch gauge	Relativdruck	psid	pounds per square inch differential	bidirektionaler Differenzdruck
psia	pounds per square inch absolute	Absolutdruck											
psis	pounds per square inch standard	Überdruck (bezogen auf festen Referenzdruck)											
psig	pounds per square inch gauge	Relativdruck											
psid	pounds per square inch differential	bidirektionaler Differenzdruck											
Reaktionszeit (Ansprechzeit)	<p>Die Reaktionszeit eines Druckmessgerätes wird je nach Messprinzip sehr unterschiedlich ausfallen. Bei einer aufwendigeren Signalaufbereitung, zum Beispiel Errechnung von Werten mit einem Mikroprozessor, kann diese bis zu einer halben Sekunde betragen. Eine eventuell eingestellte Verzögerungszeit und Dämpfung ist zusätzlich zu berücksichtigen, siehe 4.3.5.</p>												
Sensor	<p>Man spricht häufig von Sensoren, z. B. optoelektronische Sensoren, um deutlich zu machen, dass binäre Sensoren gemeint sind, im Unterschied zu Messgeräten mit Anzeigen oder Analogausgängen. Entsprechend wird auch die Bezeichnung Drucksensoren verwendet, obwohl diese Geräte teilweise Analogausgänge besitzen und den Druck anzeigen. Der Typ PA hat gar keinen binären Ausgang. Es ist aber allgemein üblich, auch in solchen Fällen von Sensoren zu sprechen, auch wenn das nicht der DIN 16 086 entspricht. Hier soll nur kurz erläutert werden, was in dieser Norm eigentlich unter Drucksensor verstanden wird. Das ist auch in der Norm etwas unübersichtlich, weil dieser Begriff zwei Bedeutungen hat. Der Sensor ist in der Norm das „Element eines Messgerätes...“, auf das die Messgröße unmittelbar einwirkt“. Der Drucksensor besteht aus diesem Element, ...„das in ein drucktragendes Gehäuse mit Druckanschluss integriert ist und eine definierte elektrische Schnittstelle ohne aktive Signalaufbereitung besitzt“ (siehe auch den Begriff Transmitter).</p>												
Signalverarbeitung	<p>Die Signalaufbereitung im Messgerät intern geschieht zunehmend digital. Dagegen gibt es noch meist analoge Ausgänge. Der Anteil am gesamten Markt ist jedoch noch gering, verglichen mit mechanischen Druckschaltern. Es gibt für Drucksensoren oder Druckmessgeräte kein einheitliches Bus-system. Zur Konfiguration, Parametrierung usw. gibt es zwar ein verbreitetes Protokoll, das HART-Protokoll, daneben werden aber auch herstellerspezifische Protokolle oder zum Beispiel auch ein Protokoll für die RS 232 verwendet. Deren Bedeutung nimmt aber ab. Das Interesse speziell von Anwendern in der Prozesstechnik z. B. für die Fernparametrierung ist groß. Es gibt natürlich Möglichkeiten der Ankoppelung an einen Feldbus, das kann aber im Einzelfall relativ teuer sein. Außerdem sind die gängigen Bus-Systeme nicht für den Betrieb im EX-Bereich ausgelegt.</p>												
Stabilität des Nullsignals	<p>Besonders bei mechanischen Geräten kann diese problematisch sein.</p>												

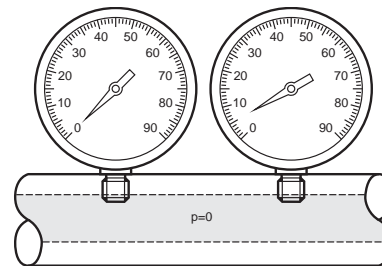


Abbildung 79: Stabilität des Nullsignals

Bei der vorgestellten Drucksensor-Familie ist das Nullsignal nicht besonders kritisch. Hier gilt auch das, was oben unter Messbeständigkeit gesagt wurde.

Statischer Druck

Der statische Druck ist der Druck, dem sich die Messgröße überlagert und dem das Messgerät ständig ausgesetzt ist. Er lässt sich zum Beispiel bei Differenzdruckmessungen gut kompensieren.

Temperatureinfluss

Der Temperatureinfluss ist die größte Fehlerquelle bei Druckmessgeräten. Er wird am besten primär (am Aufnehmer) kompensiert. Er kann auch sehr stark von der absoluten Temperatur abhängen. Die Norm fordert die Angabe von exakten Werten hierfür in den Datenblättern des Gerätes.

Transmitter

Häufig wird der englische Begriff Transmitter verwendet an Stelle der etwas umständlichen deutschen Bezeichnung Druckmessumformer. Diese Bezeichnung wird in der DIN 16 086 verwendet, die in 3.1.3, siehe dort Abbildung 21, kurz angesprochen wurde. Damit wird die Vorstufe eines Messgeräts bezeichnet. Ein Druckmessumformer oder Transmitter (genaue englische Bezeichnung: pressure transmitter) ist nach der Norm ein Druckaufnehmer (oder Drucksensor, siehe den Begriff Sensor) „mit aktiver Signalaufbereitung mit definiertem oder genormtem elektrischen Ausgangssignal“. Ein Druckmessgerät ist zusätzlich mit einer „Anzeige der Messgröße Druck oder einer davon abgeleiteten Größe“ versehen. Der PA ist also ein Transmitter, die übrigen Typen sind Messgeräte.

Überlastung

Die Überlastung des Aufnehmers durch kurze, aber hohe Druckimpulse, kommt in der Praxis häufig vor. Weiter oben wurde zum Beispiel der Mikro-Diesel-Effekt schon beschrieben. Man versucht diesem Problem entgegenzuwirken, indem man den Messweg möglichst klein hält. Er beträgt höchstens einige Mikrometer. Wird er überschritten, dann legt sich zum Beispiel die Membran an einen Anschlag an. Außerdem kann die Membran mechanisch oder hydraulisch mit einer Vorspannung versehen werden. Der Überlastbereich wird in der Norm als der Bereich definiert, in dem zwar die vorgegebenen Grenzen überschritten werden dürfen, jedoch, in gewissen Grenzen, keine bleibenden Veränderungen der messtechnischen Eigenschaften auftreten. In diesem Bereich ist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Druck und Ausgangssignal zu erwarten (siehe auch 3.3.3).

Wiederholgenauigkeit

Damit wird beschrieben, welche Abweichungen sich vom einmal angezeigten Wert ergeben können, wenn der Druck nach Schwankungen wieder auf seinen Normalwert, im Beispiel 30 bar, geht.



Abbildung 80: Wiederholgenauigkeit

In Abbildung 80 sollen Wiederholte Messungen dargestellt sein. Das Beispiel ist nicht besonders realistisch. Bei mechanischen Geräten muss man mit größeren Abweichungen rechnen.

5.3 Druckarten

Es handelt sich bei einer Druckmessung häufig um eine Relativdruckmessung. Der Zusammenhang und die Bedeutung der Bezeichnungen, die auch in der Norm 16 086 verwendet werden, soll an der folgenden Übersicht verdeutlicht werden. Man spricht hier je nach der zu bestimmenden Größe auch von Druckarten.

Ein Messgerät soll auf zwei Seiten zwei Drücken ausgesetzt sein. Es soll den Differenzdruck anzeigen. Die beiden Drücke sollen mit p_1 und p_2 bezeichnet werden. Es soll sein:

$$\text{Anzeige} \propto p_1 - p_2$$

Folgende Fälle werden unterschieden:

1. p_1 und p_2 haben beliebige Werte	2. p_2 ist ein fester Referenzdruck
Bezeichnung: Bidirektionaler Differenzdruck (engl. Vented Gauge VG)	Bezeichnung: Unidirektionaler Differenzdruck (engl. Sealed Gauge SG) manchmal auch: Überdruck SG
Spezialfall: $p_2 = \text{Luftdruck}$ Bezeichnungen: Relativdruck Überdruck (positiv oder negativ)	Spezialfall: $p_2 = 0$ (Vakuum) Bezeichnung: Absolutdruck

Der Begriff Überdruck sollte also im Sinne der Differenz zum Luftdruck verwendet werden.

Die Bezeichnung Unterdruck ist nicht zulässig. Die Norm für elektrische Druckmessgeräte, DIN 16 086, schreibt hierfür ausdrücklich die Bezeichnung "negativer Überdruck" vor.

Der Fall, dass p_2 ein fester Referenzdruck ist, lässt sich exakt nur für den Fall des Vakuums realisieren. Hat man dagegen ein Gas, z. B. Luft unter Normalbedingungen in einer Kammer eingeschlossen, dann hängt der Wert des Druckes von der Temperatur ab. Erhöht sich die Temperatur z. B. um 100°C , dann steigt der Druck um 0,36 bar. Ein solches Gerät wäre also zur Luftdruckmessung nicht geeignet, weil der Temperatureinfluss auf das Signal größer wäre als die Spanne des Messwerts. Dieser Fehler ist aber ein absoluter Fehler. Er hat umso geringere Auswirkungen, je größer der Messwert ist. Bei einem Messwert von 10 bar liegt er schon im Prozentbereich.

6 Typenschlüssel

Typenschlüssel Drucksensoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
P	N	-	1	0	0	-	S	B	R	1	4	-	K	F	P	K	G	/	US

Stelle	Bezeichnung	Inhalt
1	Sensorprinzip	P = Drucksensor (pressure)
2	Anzeige	A = Keine Anzeige B = Balken-LED D = keine Anzeige / EPDM-Dichtung E = Numerische Anzeige / EPDM-Dichtung F = Frontbündig I = Isoliert für hohe Temperaturen K = keine Anzeige L = frontbündig, keine Anzeige M = frontbündig, keine Anzeige, für hohe Temperaturen N = Numerische Anzeige (Display) P = EPS-Gerät C = kundenspezifische PB-Geräte O = kundenspezifische PN-Geräte X = Sonderschlüssel (Keine Anzeige) Y = Sonderschlüssel (Numerische Anzeige) Z = Sonderschlüssel (Balken-LED)
3	Frei	
4-6	Druckbereich	0-1 = -1 bar .25 = 250 mbar 001 = 1 bar 2,5 = 2,5 bar 010 = 10 bar 025 = 25 bar 100 = 100 bar 250 = 250 bar 400 = 400 bar 600 = 600 bar 001 (B) = 1000 mbar (Zelle 1 bar) 001 (P) = 10 PSI 003 (P) = 30 PSI 010 (P) = 100 PSI 015 (P) = 150 PSI 040 (P) = 400 PSI 100 (P) = 1000 PSI 500 (P) = 5000 PSI 600 (P) = 6000 PSI 1,0 (M) = 0,1 MPa 2,5 (M) = 0,25 MPa 010 (M) = 1 MPa 025 (M) = 2,5 MPa 100 (M) = 10 MPa 250 (M) = 25 MPa 400 (M) = 40 MPa 001 (K) = 100 kPa (Zelle 1 bar) 2,5 (K) = 250kPa (Zelle 2,5 bar) 010 (K) = 1000 kPa (Zelle 10 bar) 002 (H) = 20 "Hg (inches of mercury)

Typenschlüssel Drucksensoren

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
P	N	-	1	0	0	-	S	B	R	1	4	-	K	F	P	K	G	/	US
7	Zusatzkennung Druckbereich		- = Standard (bar) B = mbar P = PSI M = MPa K = kPa H = "Hg (inches of mercury)																
8	Zusatzbezeichnung		A = absolut R = relativ S = s gauge (Referenzdruck)																
9	Bauform / Gehäuse		B = zylindrisches Metallgehäuse, V2A; Prozeßanschluß V2A D = zylindrisches Metallgehäuse, V2A; Prozeßanschluß V4A E = zylindrisches Metallgehäuse V4A; Prozeßanschluß V4A																
10	Gewindeart des Prozeßanschlusses		A = Rohrgewinde, Konus für Metall/Metall-Dichtung B = Rohrgewinde, Nut für O-Ring-Dichtung C = Rohrgew., Fläche für O-Ring-Dichtung D = Zylindrisch G = Rohrgewinde außen M = metrisches Gewinde N = NPT-Gewinde P = PT-Gewinde (entspricht DIN 2999) R = Rohrgewinde S = Sägewinde U = UNF-Gewinde																
11-12	Gewindegröße und Durchmesser		(M) (D)xx = Durchmesser in mm 01 = 1" 14 = 1/4" 12 = 1/2" 34 = 3/4" 76 = 7/16" (P)38 = PT 3/8 (S)30= Sägewinde S30x2																
13	Frei																		

Typenschlüssel Drucksensorik

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
P	N	-	1	0	0	-	S	B	R	1	4	-	K	F	P	K	G	/	US
14	Ausgangsart		A = Analogausgang 4-20mA B = Analogausgang 0-10V C = Analogausgang 0-20mA D = Analogausgang 1-10V E = Analogausgang 4-20mA skalierbar F = Fenster H = Hysterese einstellbar K = Kombiniert (analog 4-20 mA / binär) L = Kombiniert (analog 0-10 V / binär) M = Kombiniert (analog 4-20 mA oder 0-10V / binär) Q = 2 binäre Ausgänge R = 3 binäre Ausgänge S = 4 binäre Ausgänge - = ohne																
15	Schaltfunktion		- = ohne F = Ausgangsfunktion programmierbar S = Schließer O = Öffner																
16	Ausgangssystem		B = Halbleiterausgang bei AC und AC/DC D = Dreileiter (Analog) N = Halbleiterausgang minusschaltend P = Halbleiterausgang plusschaltend R = Halbleiterausgang plusschaltend oder minusschaltend Z = Zweileiter (Analog)																
17	Kurzschlußschutz		K = mit Kurzschlußschutz O = ohne Kurzschlußschutz V = Verpolungsschutz																
18	Anschlußspannung		A = Allstrom (AC/DC) G = Gleichspannung (DC) W = Wechselspannung (AC)																
14-16	für busfähige Sensoren		ASI = AS-I-Protokoll CAN = CAN-Protokoll EPS = EPS-Protokoll PRO = Profibus-Protokoll																
19	Schrägstrich																		
20	Optionen		US = mit US-Steckverbindung SS = mit SS-Steckverbindung LS = mit LS-Stecker AR = Anschlußraum xxm = xx Meter Kabel xxmUS (LS, SS,...) = xx Meter Kabel mit US-(LS, SS,...)Stecker CSA = CSA-Zulassung E = Zellendichtung EPDM N = Zellendichtung NBR P = Zellendichtung PTFE; PZA-Dichtung FPM (VITON) V = Zellendichtung FPM (Viton)																

ENDE