

MESSEN VON STOFF- UND ENERGIESTRÖMEN

DRUCKMESSUNG

Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach

Wintersemester 2016/2017

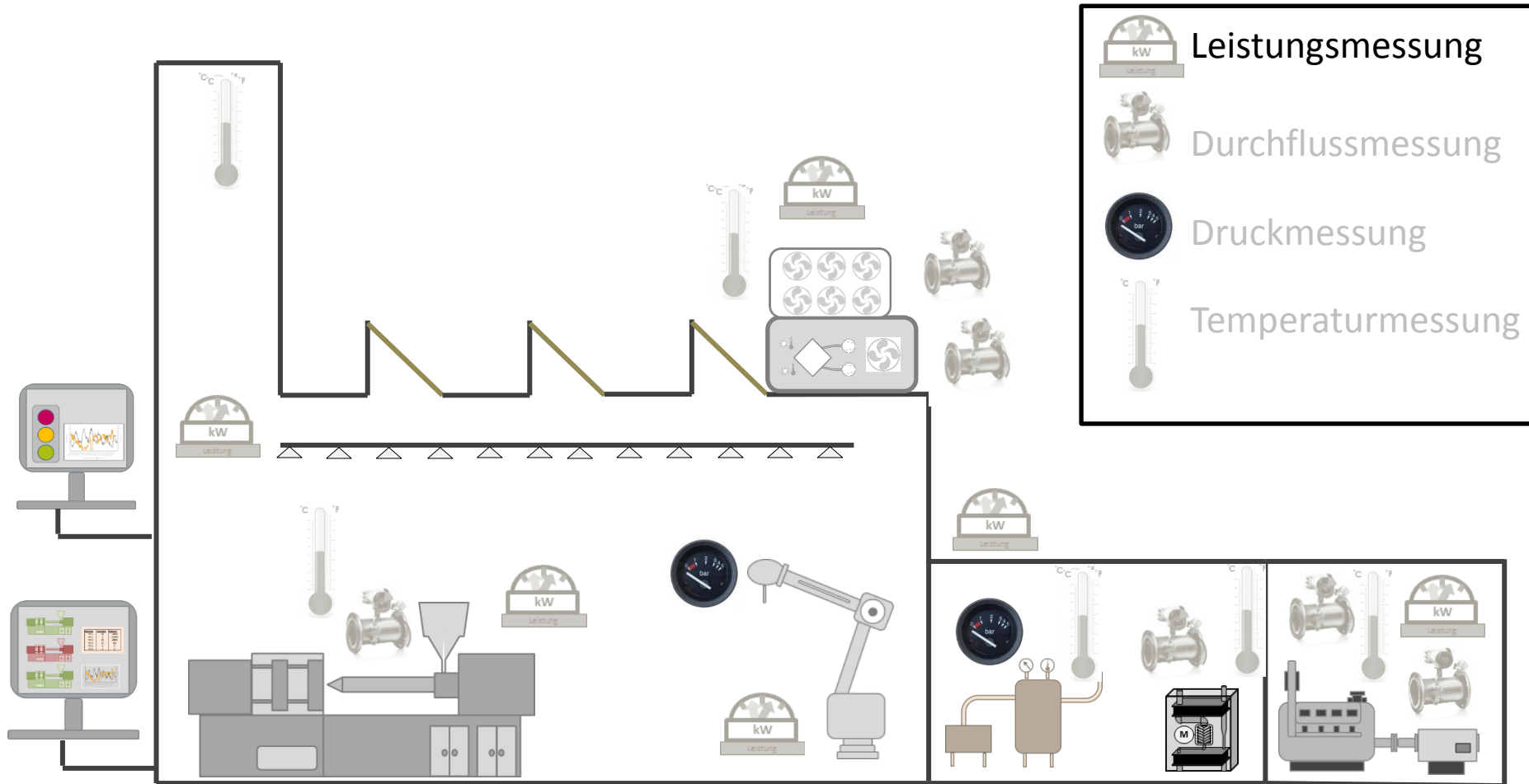


Inhalte der Vorlesung

- Historie / Einführung
- Grundlagen
- Verfahren der Druckmessung
 - Direktanzeigende Manometer
 - Dehnungsmessstreifen
 - Piezoresistive, kapazitive und induktive Messungen
- Statische und dynamische Druckmessung
- Anwendungsbeispiele

Messtechnik im Industriebetrieb

Druckmessung



Historie / Einführung

DRUCKMESSUNG

Einführung

- Der Druck ist nach der Temperatur für verfahrenstechnische Prozesse die wichtigste Größe zur Bestimmung des Systemzustandes
- Für die Druckmessung gilt, dass es keinen universellen Sensortyp gibt
- Jedes Verfahren weist bei bestimmten Anwendungen Vorteile auf und ist dafür an anderer Stelle nicht empfehlenswert
- Messbereich, Genauigkeit, Preis, Temperaturbereich und Baugröße des Sensors sind nur einige Auswahlkriterien

Grundlagen

DRUCKMESSUNG

Definition Druck

Der Druck (Formelzeichen: p) ist die auf ein infinitesimal kleines Flächenelement dA wirkende Kraft dF :

$$p = \frac{dF}{dA}$$

Bei einem über der Fläche A konstanten Druck gilt:

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

Einheiten

- Die SI-Einheit für den Druck ist Pascal (Pa): $1Pa = 1 \frac{N}{m^2}$
- Die große praktische Bedeutung der Größe „Druck“ spiegelt sich in der Vielzahl von abgeleiteten (und zum Teil veralteten) Einheiten wieder
- Dabei werden diese in verschiedenen Gebieten von Wissenschaft und Technik angewendet

- Weitere Umrechnungen:**

1 hPa = 1 mbar

1 Pa = 1 N/m²

1 mmHg = 1 Tor

1 kp/cm² = 1 at

at = technische Atmosphäre
atm = physikalische Atmosphäre

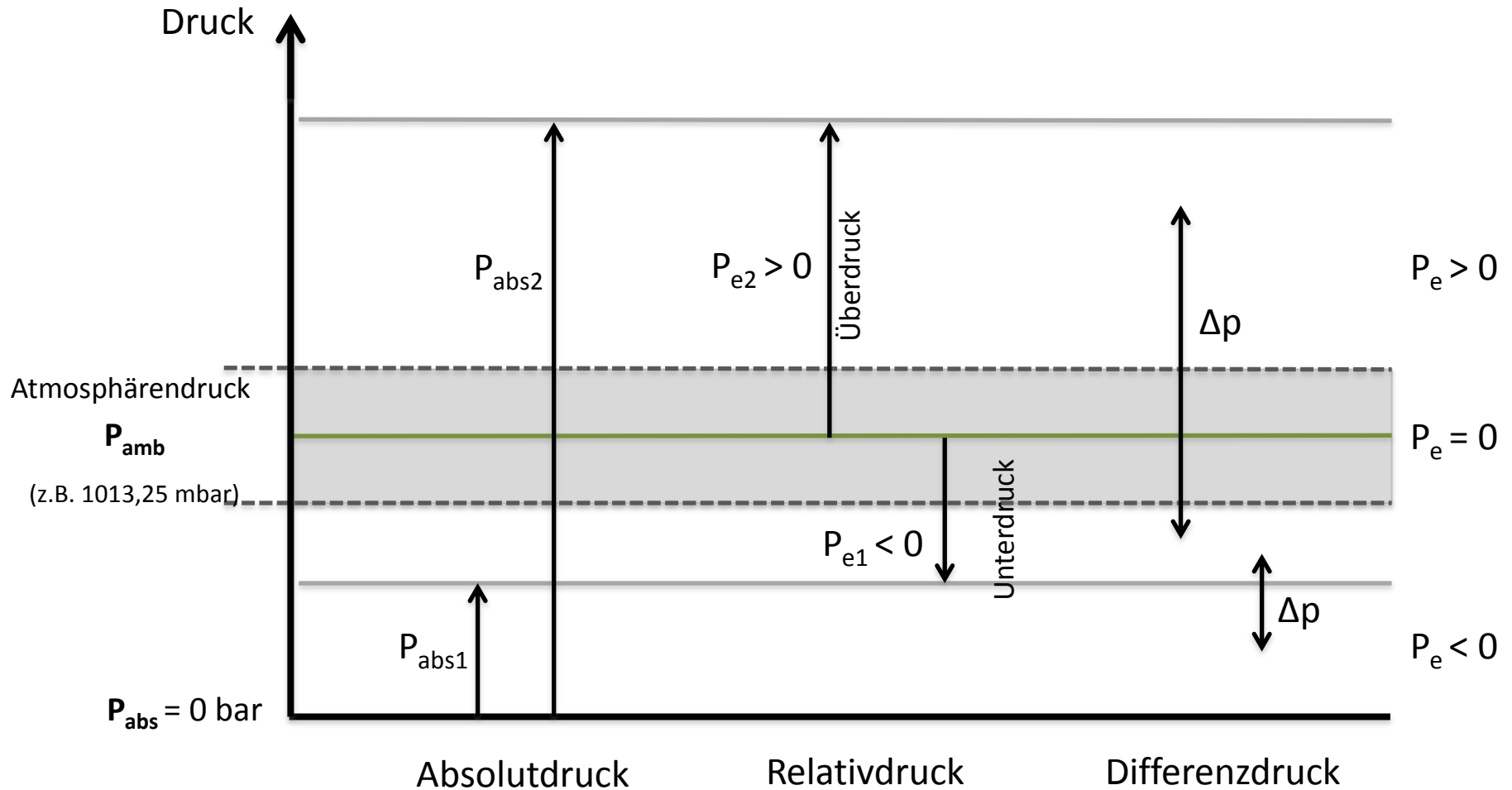
	SI-Einheiten			Technische Einheiten		
	bar	mbar	Pa	mmHg	Kp/cm ²	atm
1 bar	1	10 ³	10 ⁵	750,064	1,01972	0,986923
1 mbar	10 ⁻³	1	100	750,064 x10 ⁻³	1,01972 x10 ⁻³	0,986923 x10 ⁻³
1 Pa	10 ⁻⁵	0,01	1	7,50064 x10 ⁻³	10,1972 x10 ⁻⁶	9,86923 x10 ⁻⁶
1 mmHg	1,3322 x10 ⁻³	1,3322	133,322	1	1,35951 x10 ⁻³	1,31579 x10 ⁻³
1 kp/cm ²	0,980665	0,980665 x10 ³	98,0665 x10 ³	735,561	1	0,967841
1 atm	1,01325	1,01325 x10 ³	1,01325 x10 ⁵	760	1,03323	1

Tabelle: Einheiten-Umrechnungen

Einheiten

- Aus der Definition von p wird die Analogie zur mechanischen Größe „Kraft“ deutlich. Es ist also naheliegend, dass die Druckmessung auf die Messung einer Kraft zurückzuführen ist
- Es werden folgende Druckpotenziale unterschieden:
 - **Absolutdruck:** Der Druck wird gegenüber dem Vakuum, also $p = 0$ Pa gemessen
 - **Überdruck/Unterdruck:** Der Druck wird relativ zum Atmosphärendruck (ca. $p = 10^3 \times 101$ Pa) angegeben
 - **Differenzdruck:** Die Ausgangsgröße des Sensors ist proportional zur Differenz von zwei Drücken

Druckarten



Quelle: angelehnt an: http://www.first-sensor.com/cms/upload/images_others/portal_Druckarten.jpg

U-Rohr Manometer I

- U-Rohre stellen eine sehr einfache Möglichkeit der Druckmessung dar, die zu Vergleichs- und Kontrollzwecken eingesetzt werden
- Sie bestehen aus einem mit einer Flüssigkeit der Dichte ρ gefüllten U-Rohrs
- Sie können nur zur Messung kleinerer Drücke eingesetzt werden

U-Rohr Manometer II

- Dabei wird die als Grundgleichung der Hydrostatik bezeichnete Formel verwendet:

$$p = p_0 + \rho g h$$

- Sie besagt, dass sich der Druck in einer Flüssigkeit zusammensetzt aus:
 - dem Druck an der Oberfläche und
 - einem Anteil, der nur von der Dichte der Flüssigkeit und der Höhe der Säule abhängt.
- Damit gilt für das skizzierte Beispiel:

$$p_1 - p_2 = \rho g h$$

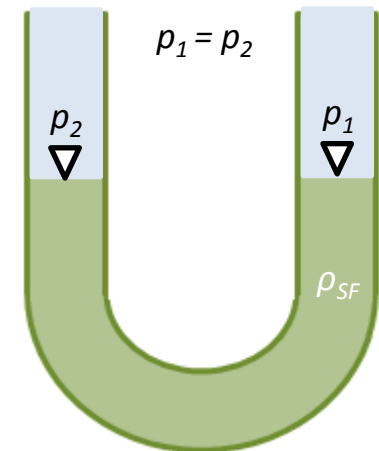
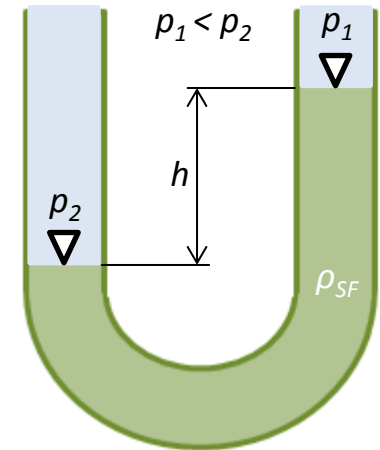


Abb.: U-Rohr Manometer

Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/U-Rohr-Manometer#/media/File:Manometer_eben.png

Normen

- DIN EN 472, Druckmessgeräte – Begriffe
- DIN EN 837-1, Druckmessgeräte mit Rohrfedern; Teil 1: Maße, Messtechnik, Anforderungen und Prüfung
- DIN EN 837-2, Druckmessgeräte; Teil 2: Auswahl- und Einbauempfehlungen für Druckmessgeräte
- DIN EN 837-3, Druckmessgeräte mit Platten- und Kapselfedern; Teil 3: Maße, Messtechnik, Anforderungen und Prüfung

DIREKTANZEIGENDE MANOMETER

Direktanzeigende Manometer

- Unter dieser Bezeichnung laufen die Messgeräte, bei denen sich mechanische Größen unter Druckeinwirkung ändern
- Sie liefern damit primär nur eine Vor-Ort-Anzeige ohne elektrisches Signal
- Durch die Nutzung mechanischer Größen entfällt bei diesen Sensoren die Notwendigkeit zur Bereitstellung einer elektrischen Hilfsenergie

Federmanometer I

- Häufigste Methode zur Vor-Ort-Anzeige des Drucks
- Vielzahl verschiedener Federformen
- Die grundsätzliche Gemeinsamkeit liegt in der Ausnutzung der elastischen Verformung einer Feder unter Druckeinwirkung
- Durch eine entsprechende Mechanik wird diese Verformung auf einen Zeiger übertragen und als analoge Größe angezeigt

Federmanometer II

Bourdonprinzip

- In fast allen Druckuhren ist die nach ihrem Erfinder benannte *Bourdonfeder* enthalten
- rund gebogene Feder ovalen Querschnitts, die sich unter Druckeinwirkung aufbiegt
- Häufige Verwendung bei hohen Drücken (bis etwa 1000 bar)
- Aufgrund der Krümmung ist die Außenfläche größer als die Innenfläche
- Innerhalb der Rohrfeder sind die Drücke gleich, nach der Formel $F = p \cdot A$ sind die Kräfte auf der Außenfläche größer
- es kommt zur Aufbiegung der Rohrfeder

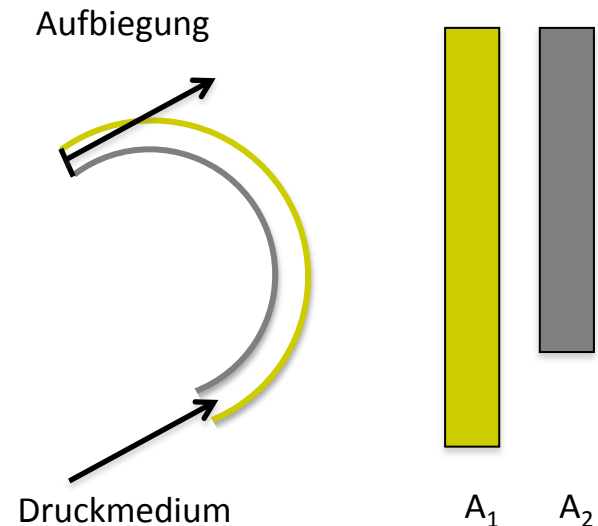
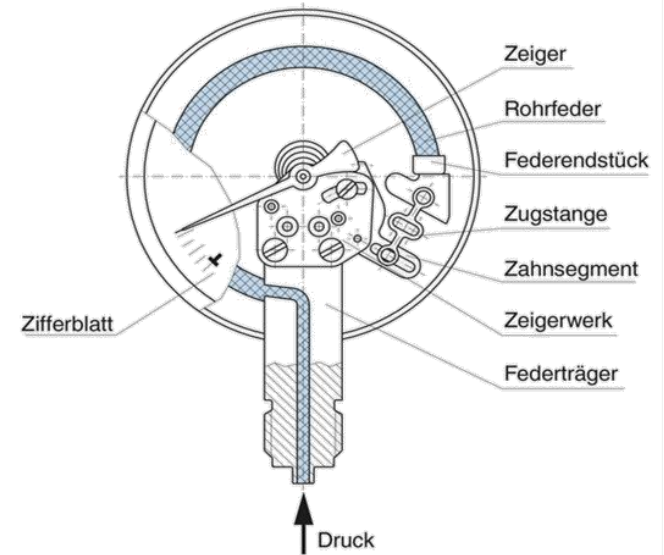


Abb. oben: Bourdonfeder

Quelle: http://blog.wika.de/files/2015/07/rohrfeder-manometer-funktion_neu.jpg

Abb. unten: Bourdonprinzip

Plattenfederanometer

- Plattenfederanometer weisen eine ähnliche Mechanik zur Umwandlung der Auslenkung in eine Drehbewegung des Zeigers auf
- Dieser Messgerätetyp deutet bereits auf die Messverfahren hin, die eine elektrische Größe als Ausgangssignal zur Verfügung stellen

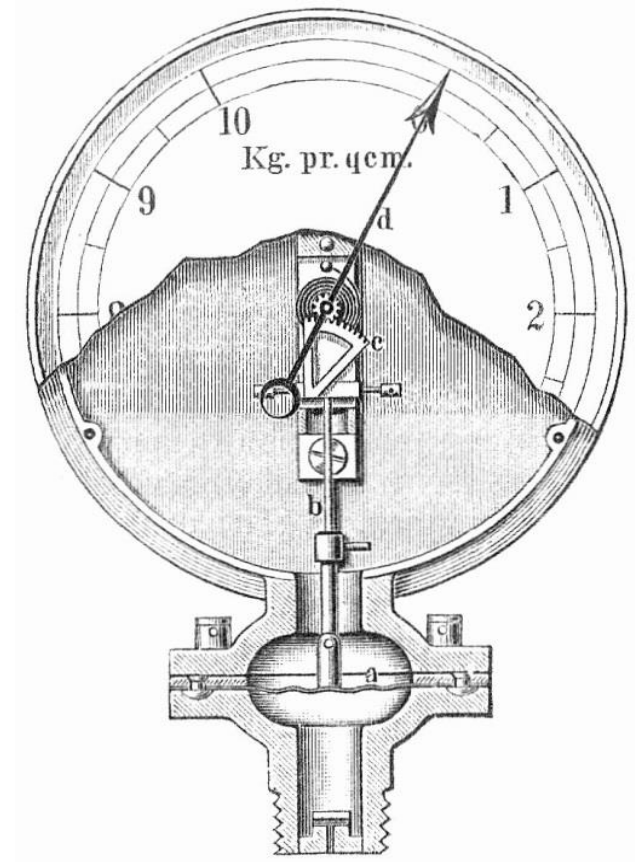


Abb.: Plattenfederanometer

Quelle: <http://images.zeno.org/Meyers-1905/I/big/130240a.jpg>

Bewertung Federmanometer

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• Große Stückzahlen	<ul style="list-style-type: none">• Nur Druckanzeige am Messort möglich
<ul style="list-style-type: none">• Billig und robust	
<ul style="list-style-type: none">• Einfache Bedienung	<ul style="list-style-type: none">• Gemessene Größe kann nicht übertragen bzw. weiterverarbeitet werden
<ul style="list-style-type: none">• Weite Palette von Messbereichen	

→ Im Rahmen der modernen Prozessleittechnik werden Drucksensoren benötigt, die ihre Information als elektrische Größe zur Verfügung stellen

DEHNUNGSMESSSTREIFEN

Dehnungsmessstreifen I

- Vielen Typen von Druckmessgeräten ist die durch Druck ausgelenkte Membran gemeinsam
- Unter Dehnungsmessstreifen (DMS) versteht man kleine, metallische Leiterbahnen mit mäanderförmiger Struktur (mm-Bereich)



Abb.: Dehnungsmessstreifen

Quelle: Hesselbach et. al. (2012)



Abb.: Dehnungsmessstreifen

Quelle: <http://www.itwissen.info/bilder/dehnungsmessstreifen-foto-telemotorix-dotde.png>

Dehnungsmessstreifen II

- Durch Einwirken einer äußeren Kraft F vergrößert sich die Länge des Leiters und damit sein elektrischer Widerstand
- Aufgrund der Mäanderform des Leiters wird eine Richtungssensitivität des DMS erreicht
- Die Kräfte in y -Richtung verursachen nur vernachlässigbar kleine Widerstandsänderung
- DMS werden eingesetzt zur Messung von Kräften, Dehnungen und Spannungen
- Sie stellen das am häufigsten eingesetzte Messprinzip mit elektrischem Ausgangssignal dar

Dehnungsmessstreifen III

Erzeugung eines elektrischen Signals

- Eine so genannte DMS-Rosette mit 3 Widerständen wird auf eine Membran aufgeklebt
- Unter Druck verformt sich mit der Membran auch der DMS
- Durch Verschaltung dieser Widerstände in Form einer Wheatstonebrücke steht mit der Diagonalspannung der Brücke ein Signal zur Verfügung
- Dieses Signal steht in eindeutigen Zusammenhang zum Druck auf die Membran

Bewertung von Dehnungsmessstreifen

Vorteile	Nachteile
• Unempfindlich gegen Druckspitzen	• Relativ kleines Ausgangssignal
• Einsetzbar bei hohen Drücken	• Bei kleinen Drücken nicht einsetzbar
• Auch in Hydrauliksystemen verwendbar	

PIEZORESISTIVE, KAPAZITIVE UND INDUKTIVE MESSUNGEN

Piezoresistive Drucksensoren I

- Wird ein Siliziumkristall einer Druckkraft ausgesetzt, ändert sich sein spezifischer Widerstand (gr.: *piezein* = drücken)
- Beim piezoresistiven Verfahren wird der Widerstand von Widerstandspfaden, die in einen Siliziumkristall eindiffundiert sind, gemessen
- Durch diese Technik sind kleinere Baugrößen und höhere Empfindlichkeiten möglich

Piezoresistive Drucksensoren II

- Bei den piezoresistiven Verfahren wird der Druck nicht direkt, sondern über eine Füllflüssigkeit (bsp. Silikonöl) auf die Messmembran aufgetragen
- Durch die Temperaturabhängigkeit der Übertragungsflüssigkeit wird das Verfahren durch Änderungen der Temperatur beeinflusst, welche kompensiert werden muss
- Neben hohen Genauigkeiten und kleinen Baugrößen sind schnelle Reaktionszeiten und ein weiter Messbereich die Vorteile von piezoresistiven Drucksensoren

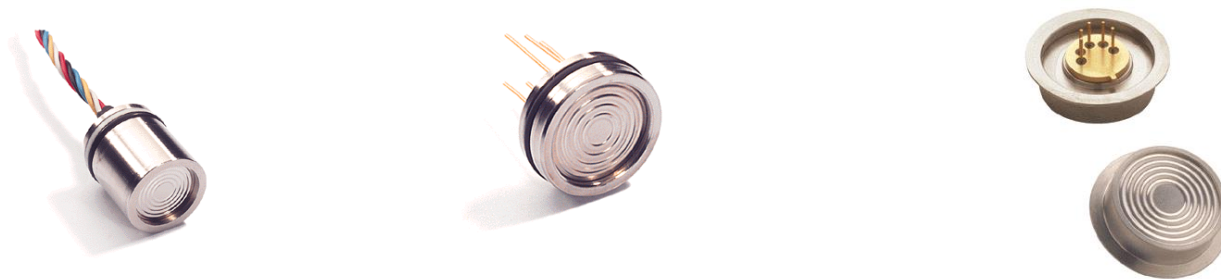


Abb.: Drucksensoren

Quelle: <https://www.keller-holland.nl/pictures/products/serie10eexd.gif>

Kapazitive Drucksensoren I

- Sehr empfindliche Messmethode
- Die Kapazität eines Plattenkondensators der Fläche A berechnet sich aus:

$$C = \epsilon_0 * \epsilon_r * \frac{A}{d}$$

- Wird durch Druckeinwirkung der Plattenabstand d verändert, so ändert sich auch die Kapazität
- Auswertung der Änderungen üblicherweise durch Wechselstrommessbrücken

Größe	Beschreibung	Einheit
ϵ_0	el. Feldkonstante ($8,85419 \cdot 10^{-12}$)	C/Vm
ϵ_r	Dielektrizitätszahl	-

Kapazitive Drucksensoren II

- Sensor besteht aus einer Scheibe mit Metallbeschichtungen
→ bilden einen Messkondensator
- Bei Veränderung des Messdrucks p_2 verändert sich aufgrund der elastischen Durchbiegung der Membran auch die Kapazität C_p
- Wenn an P_1 Atmosphärendruck beaufschlagt wird handelt es sich um eine Überdruckmessung
- Wird stattdessen ein zweiter veränderlicher Druck gewählt, so verfügt man über ein Differenzdruckmessgerät mit kapazitivem Abgriff

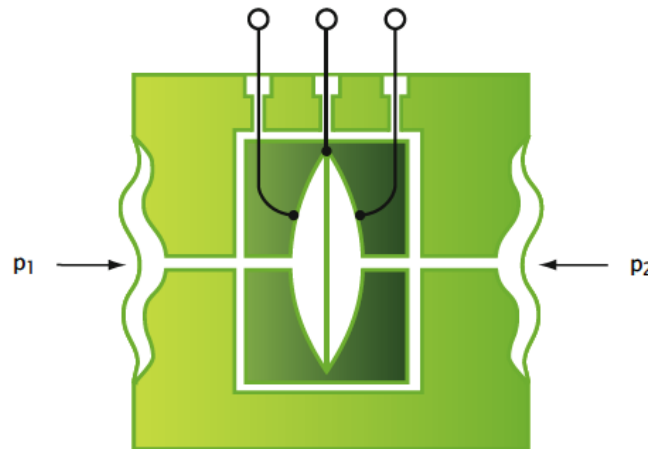


Abb.: Prinzipieller Aufbau kapazitiver Drucksensor (Überdruckmesswerk mit kapazitivem Abgriff)

Quelle: Hesselbach et. al. (2012)

Induktive Verfahren I

- Statt kapazitive auch induktive Auslenkung der Membran möglich
- Die Membran (1) hat die Aufgabe, den Sensor vom Prozess zu trennen und den Druck in die mechanische Größe Dehnung umzusetzen
- Bei Auftreten einer Druckdifferenz p_1-p_2 verschiebt die Membran die Mittelachse (2) in die Ölfüllung (3), woraus eine Änderung der Induktivität der Spulen resultiert
- Ausgewertet wird diese Information üblicherweise unter Verwendung von Wechselstrommessbrücken

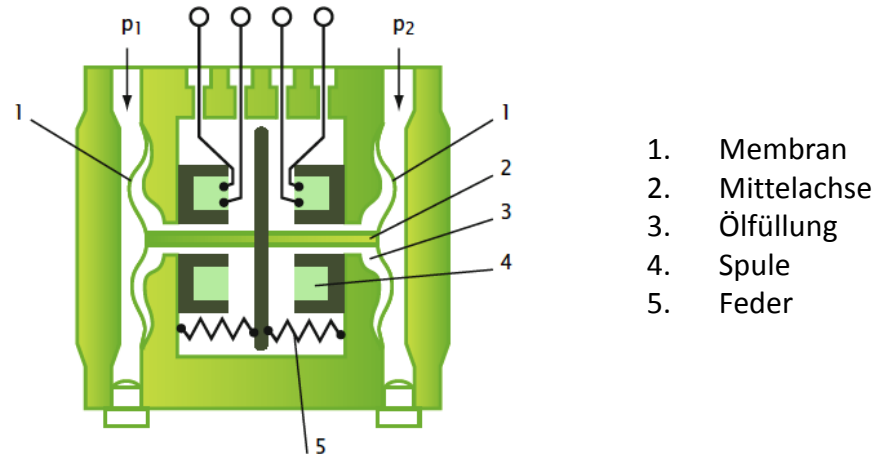


Abb.: Prinzipieller Aufbau induktiver Differenzdrucksensor

Quelle: Hesselbach et. al. (2012)

Induktive Verfahren II

- Induktive Geber nutzen meist einen der folgenden Effekte:
 - Die Induktivität einer Spule ändert sich durch Einbringen oder Entfernen von Eisen im Kern
 - Der Kopplungsgrad zwischen zwei Spulen ist abhängig vom Material des Spulenkerns. Verändert sich die Eisenmenge im Kern, so ändert sich auch die in der Sekundärspule induzierte Spannung (Differential-Transformator)

Übersicht der Messverfahren

Druckaufnehmer	Genauigkeit	Empfindlichkeit in mV/hPa	Messbereich in bar
DMS	0,1 – 1 %	1 – 10	1 – 3500
Piezoresistiv	0,1 – 1 %	10 – 100	1 – 150
Kapazitiv	0,05 – 0,5 %	1 – 5	0,01 – 500
Induktiv	0,5 – 1 %	0,1 - 1	0,01 – 200

Quelle: Hesselbach et. al. (2012)

STATISCHE UND DYNAMISCHE DRUCKMESSUNG

Druckarten

- In fließenden Medien gibt es drei verschiedene Druckarten:
Statischer Druck p_{st} , dynamischer Druck p_{dyn} und Gesamtdruck p_{ges}
- Es gilt:
$$p_{ges} = p_{dyn} + p_{stat}$$

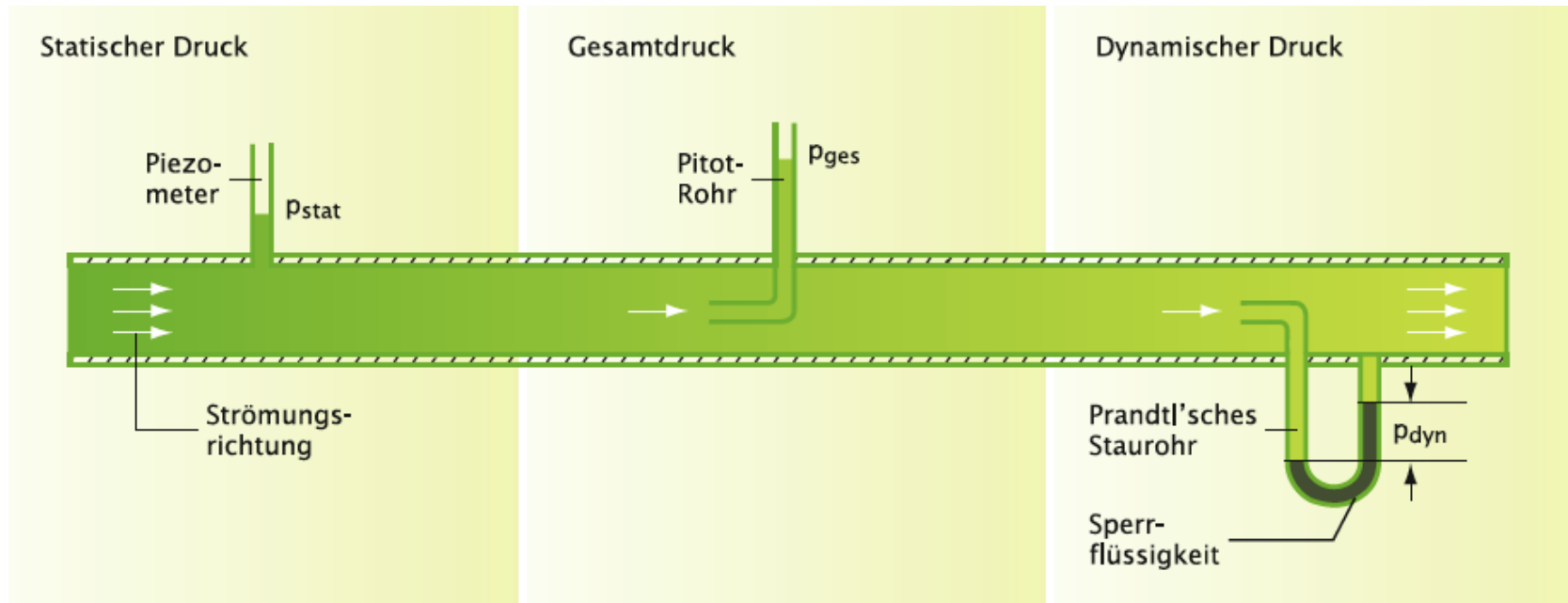


Abb.: Messung unterschiedlicher Drücke in Strömungen

Quelle: Hesselbach et. al. (2012)

Druckarten

Gesamtdruck

- Der Gesamtdruck in einer strömenden Flüssigkeit ist die Summe aus dem statischen und dem dynamischen Druck

$$p_{ges} = p_{dyn} + p_{stat}$$

Dynamischer Druck

- Wird durch die Strömungskraft der Flüssigkeit hervorgerufen
- Wirkt nur in Strömungsrichtung, auch Staudruck oder Fließdruck genannt
- Ruht die Flüssigkeit, dann ist die Geschwindigkeit und damit auch der dynamische Druck gleich null

$$p_{dyn} = \frac{\rho}{2} * v^2$$

Statischer Druck

- Er wird durch eine, auf die Flüssigkeit wirkende Zusammendrückkraft erzeugt
- Dabei breitet er sich in der Flüssigkeit in alle Richtungen gleich aus

Messverfahren

Piezometer

- Liegt die Messstelle senkrecht zur Strömungsrichtung, so wird nur der **statische Druck** gemessen

Pitot-Rohr

- Befindet sich die Messstelle in Strömungsrichtung, so wird der **Gesamtdruck** gemessen, der sich aus dem dynamischen und dem statischen Druck zusammensetzt
- ragt in das Rohr hinein und hat eine 90° - Biegung, so dass die Messstelle gegen die Strömungsrichtung steht

Prandtl'sches Staurohr

- Den **dynamischen Druck** allein misst man durch eine Druckdifferenzmessung, es ist eine Kombination aus einem Pitot-Rohr und einem Piezometer

VIELEN DANK

Quellen (Auszug)

- Hoffmann, J.: Taschenbuch der Messtechnik. Fachbuchverlag Leipzig, im Carl Hanser Verlag, München Wien, 3. Auflage, 2002.
- Hesse, S., Schnell, G.: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 3. Auflage, 2004.
- Hesselbach et. al.: Energie- und klimaeffiziente Produktion – Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Springer Vieweg Verlag, 1. Auflage 2012.