

Messen in der Fluidtechnik

Teil 8: Mechanische Druckmesstechnik

Michael Meckl, Ewald Rössner

Die mechanische Druckmesstechnik dient in erster Linie dazu, vor Ort und fremdenergiefrei die Vorgänge innerhalb fluidtechnischer Anlagen an wichtigen Punkten zu erfassen und sichtbar zu machen. Fast immer werden federelastische Druckmessgeräte eingesetzt. Sie ermöglichen eine übersichtliche Messwertablesung über eine Analoganzeige. Die altbewährte, robuste und kostengünstige Technik der Geräte führen zu einer großen Verbreitung der mechanischen Druckmesstechnik.

Druckmessung – Historisches

Nach DIN 1314 „Druck – Grundbegriffe, Einheiten“ heißt es: Die physikalische Größe „Druck“ ist der Quotient aus der Normalkraft F_N , die auf eine Fläche A wirkt.

$$\text{Druck: } p = \frac{F_N}{A}$$

Die physikalische Größe „Druck“ hat den Menschen schon zu früheren Zeiten interessiert. *Archimedes* (285-212 v. Chr.) fand heraus was es mit dem Wasserdruck auf sich hat und *Heron von Alexandria* (um 100 v. Chr.) benutzte Luft- und Wasserdruck für allerlei technische Spielereien, die damals wie Zauberei wirkten. Nur messen konnte man den Druck lange Zeit nicht. Erst *Torricelli* (1603-1647) und *Pascal* (1623-1692) machten den Luftdruck messbar und *James Watt* (1736-1819) erfand einen „Dampfmaschinen-Indikator“, mit dem er Luft bzw. Dampfdruck und Vakuum messen konnte. Für Druckmessungen im Hochdruckbereich brachte *Eugene Bourdon* im Jahre 1849 das so genannte Bourdon-Rohr auf den Markt. Das Bourdon-Rohr, das heute wohl am häufigsten verwendete Messglied, wird heute als „Rohrfeder“ (**Bild 1**) bezeichnet. Das aus dem Griechischen kommende Wort Manometer ist der Sammelbegriff für Messgeräte, mit denen Drücke gemessen werden können.

Autoren: Michael Meckl war bei Erstellung des Fachbeitrags Leiter Produktmanagement Prozessgeräte (jetzt nicht mehr bei WIKA tätig), Ewald Rössner ist Senior Produktmanager Prozessgeräte bei WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG in 63911 Klingenberg

Mechanische Druckmesstechnik

Die mechanische Druckmessung hat ihre Stärken eindeutig, wenn es um schnelle und trotzdem genaue Messungen geht, die ohne großen Aufwand durchgeführt werden sollen. Dazu gehört auch die Dauerkontrolle von Messpunkten mit festeingebauten Manometern oder Druckschaltern. Viele Praktiker geben wegen der einfachen Handhabung, der geringen Kosten und der unmittelbaren und zuverlässigen Beobachtungsmöglichkeit von Tendenzen, der mechanischen Druckmessung immer noch den Vorzug vor der elektrischen Messung. Einen fließenden Übergang von der mechanischen zur elektrischen Druckmessung stellen Kontaktmanometer und Druckschalter oder Manometer mit integrierten Ferngebern dar. Sie verbinden die Vorteile der Mechanik mit denen der Elektronik, d. h. die Basis ist ein mechanisches Messgerät, welches ein mechanisches Eingangssignal in ein elektrisches Ausgangssignal umsetzt. Trotz der vorangehenden „Elektronifizierung“ und aller Mikroelektronik und Mikroprozessortechnik stellen die mechanischen Druckmessgeräte wie Kolbenmanometer und Feinmessmanometer immer noch die Referenz bei der Kalibrierung bzw. Eichung elektrischer Druckmessgeräte dar.

In der Manometrie können die mechanischen Druckmessgeräte in zwei Kategorien unterteilt werden. Man unterscheidet hierbei in der Messmethode zwischen

- unmittelbaren (direkten) und
- mittelbaren (indirekten).

Die Geräte mit der unmittelbaren (direkten) Messmethode werden heutzutage



eher selten verwendet (geringe Stückzahlen). Aufgrund höchster Genauigkeit finden sie ihre Daseinsberechtigung in der Kalibrierung von Prüfnormalen. Man unterscheidet hier zwischen Flüssigkeits- und Kolbenmanometern. Die mittelbare (indirekte) Messmethode erlaubt eine übersichtliche und sofortige Ablesbarkeit des Messwerts, über einfache und preiswerte Geräte mit Analoganzeige. Dies sind wahrscheinlich die Gründe für die weite Verbreitung der Messgeräte, die mit federelastischen Kraft-/Druckaufnehmern arbeiten. Auf die unterschiedlichen Ausführungen der Messgeräte nach der direkten und indirekten Messmethode wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

Unmittelbare (direkte) Messmethode

Flüssigkeitsmanometer

Flüssigkeitsmanometer sind mit kommunizierenden Röhren gleichzusetzen und arbeiten mit einer Flüssigkeit als Messelement. Dabei wird die Kraftwirkung je Flächeneinheit gemessen. Also die Kraft, die von der Masse einer Flüssigkeitssäule verursacht wird. Die Säulen lassen sich ohne großen Aufwand von Arbeit bewegen und haben eine geringe Kohäsionskraft. Die Oberfläche einer Flüssigkeit ist waagrecht, und wegen der leichten Verschiebbarkeit der Flüssigkeitsmoleküle steht die auf der Oberfläche wirkende Kraft senkrecht zu ihr. Der Druck (Druckunterschied) stellt sich in der unterschiedlichen Höhe der Flüssigkeiten dar. Es gilt die Beziehung:

$$\Delta p = h \times \rho \times g$$

1: Das Bourdon-Rohr wird heute als Rohrfeder bezeichnet

Dabei ist:

Δp = Über- oder Unterdruck in Pa

h = Höhe in m

ρ = Dichte der Messflüssigkeit in kg/m^3

g = Fallbeschleunigung in m/s^2

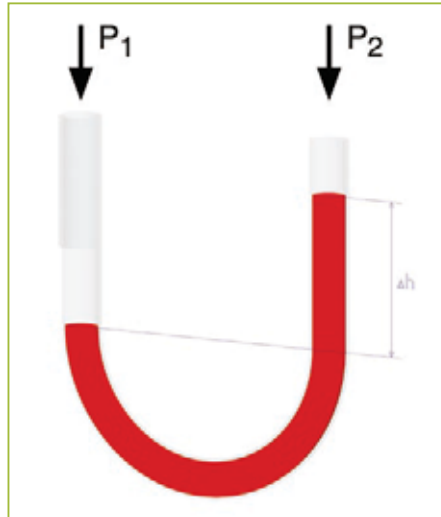
Die bekannteste Form des Flüssigkeitsmanometers ist das U-Rohr (**Bild 2**). Als Messflüssigkeiten werden u. a. Wasser, Quecksilber, Glycerin und Äthylalkohol verwendet. Die praktische Verwendung der Messflüssigkeiten ergibt sich aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaft.

Kolbenmanometer

Die Kolbenmanometrie ermöglichte erstmals, auch höhere Drücke einwandfrei zu messen. Heute werden Kolbenmanometer (auch Druckwaagen genannt) in hochpräzisen Ausführungen im Wesentlichen zum Eichn von federelastischen Druckmessgeräten verwendet. Kolbenmanometer (**Bild 3**) gibt es mit einfachen und mit Differentialkolben. Die Messbereiche liegen bei Anwendung des einfachen Kolbens bis ca. 200 bar und beim Differentialkolben bis 10000 bar. Da die Belastungen (durch Gewichte) und die beaufschlagte Kolbenflächen exakt bestimmbar sind, ist der Messfehler bei diesen Geräten sehr gering. Um den Aufbau von radialen Kräften zu ermöglichen, die eine permanente Zentrierung des Kolbens bewirken, kann bei vielen Ausführungen der Messkolben in Drehung versetzt werden. Damit wird eine größtmögliche Beweglichkeit des Kolbens in vertikaler Richtung und ein minimaler Austritt von Druckflüssigkeit erreicht. Mit Kolbenmanometern dieser Bauart sind Messungen mit äußerst geringen Messunsicherheiten möglich. Auch im Bereich höherer Drücke liegen die Unsicherheiten bei nur $\pm 0,01\%$ vom jeweils gemessenen Wert.

Mittelbare (indirekte) Messmethode

Im Bereich der Fluidtechnik werden vorwiegend Manometer mit der indirekten Mess-

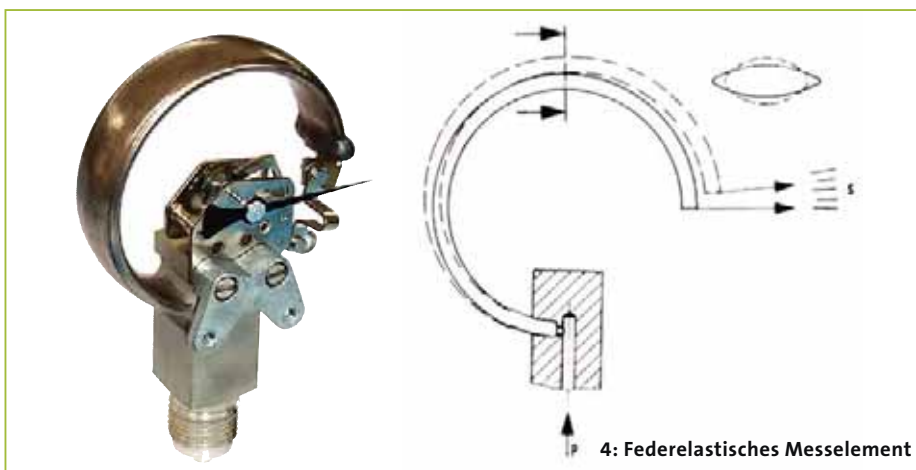


2: Die bekannteste Form des Flüssigkeitsmanometers ist das U-Rohr



3: Kolbenmanometer gibt es mit einfachen und mit Differentialkolben

methode, so genannte Manometer mit federelastischem Messelement (Messglied) verwendet. Hierbei ist die zeitweilige und gewünschte Verformung eines Messelementes durch Beaufschlagung seiner aktiven Fläche das Maß für die Größe des Druckes. Diese Deformation wird durch eine Hebelübersetzung auf einer Skala angezeigt. Der Weg des Zeigers ist an dieser Skala messbar. Dabei entsprechen die Skalenwerte bestimmten physikalischen Einheiten des Drucks. Bei konstanter Belastung nimmt die Deformation des Messelementes geringfügig zu, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Nach Entlastung geht die Deformation nicht sofort



4: Federelastisches Messelement

Der neue Star am Ventilhimmel: 4/3-Wege- Proportional-Ventil der Baureihe 391 mit Bus-Schnittstelle



Bus-Technik

HANNOVER-MESSE 2011
04. - 08.04.2011
Halle 19, Stand C 09

Das vorgesteuerte, proportionale 4/3 Wege-Magnetventil arbeitet nach dem Druckverteilerprinzip mit dem Betriebsdruck, ohne zusätzliche Druckreduzierventile. Ansteuerung über Linearmotor; dadurch hohe Ventildynamik.

Bus bedeutet: geringer Verkabelungsaufwand.

Die integrierte Elektronik macht das Ventil netzwerkfähig und äußerst wartungsfreundlich.

Mit dem TRIES-Mehrfachmodul IP 68 werden herkömmliche Stetig- und Proportionalventile ebenfalls bus- und diagnosefähig.

Sprechen Sie mit uns.



TRIES-Mehrfachmodul IP 68

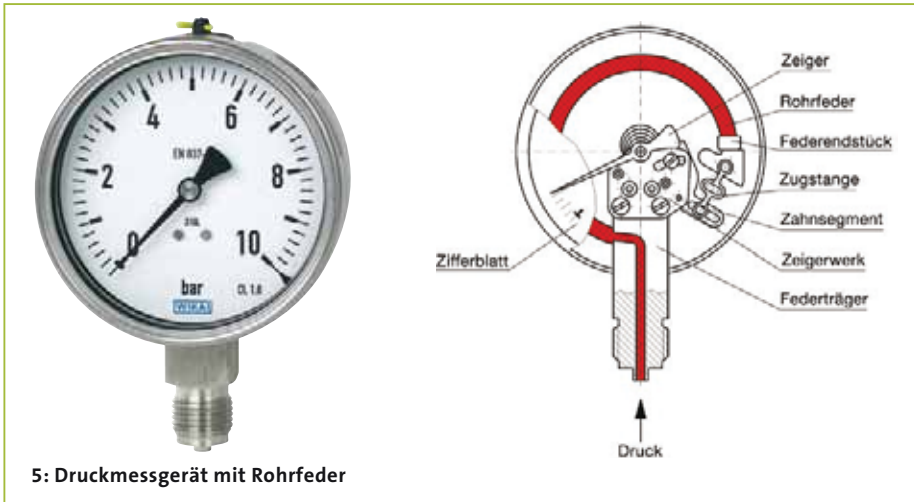
TRIES GmbH & Co. KG
Hydraulik-Elemente EHINGEN
Röntgenstrasse 10
D 89584 EHINGEN
Fon 00 49 (0)73 91/58 09-0
Fax 00 49 (0)73 91/58 09-50
e-mail: info@tries.de
www.tries.de

TRIES – Hydraulikpartner für innovative Produktideen.



TRIES

Weitere Informationen www.vfv1.de/23788140

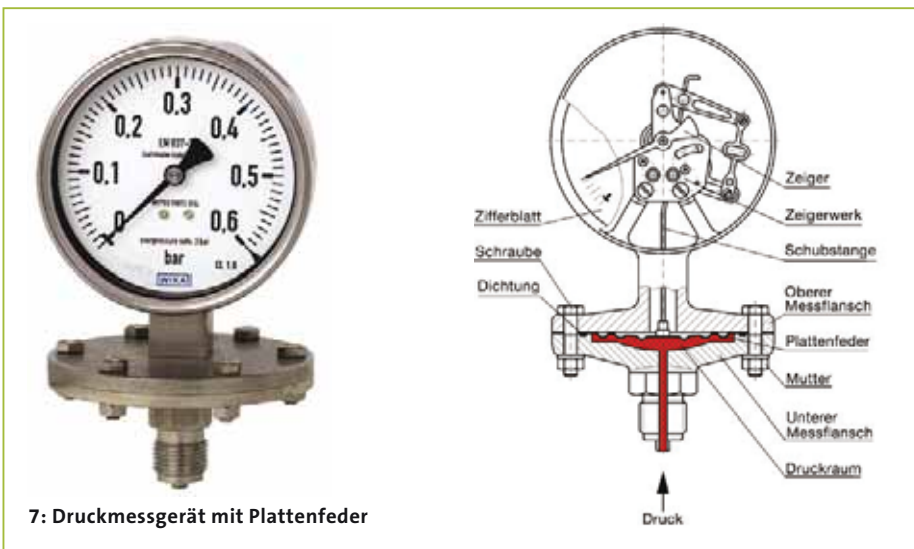


5: Druckmessgerät mit Rohrfeder



6a: Kreisformfeder in C-Form als Messelement

6b: Schraubenformfeder als Messelement



7: Druckmessgerät mit Plattenfeder

auf den Ausgangswert zurück, sondern es bleibt zunächst ein geringer Restwert, der erst mit der Zeit abnimmt. Diese messbare Erscheinung wird als Hysterese bezeichnet. Bei Überlastung des Messelements wird die Elastizitätsgrenze überschritten und die Deformation bildet sich nicht auf den ursprünglichen Wert zurück (**Bild 4**).

Es gibt unterschiedliche Arten von federelastischen Druckmessgeräten. Die Einsatzbereiche werden im Wesentlichen nach Kriterien ausgewählt, die nach erforderlichen Druckbereichen und damit aufgrund der technisch bedingten Grenzen der verwendeten Messelemente bestimmt werden.

Druckmessgeräte mit Rohrfeder (Bourdon-Tube)

Rohrfedern sind kreisförmig gebogene Rohre mit nicht rundem Querschnitt. Der abgeflachte Querschnitt versucht bei Druckbeaufschlagung im Inneren der Rohrfeder eine kreisrunde Form anzunehmen. Die dadurch entstehende Vergrößerung des Biegeradius führt am Endpunkt der Rohrfeder zu einer Bewegung, die von einer Zugstange aufgenommen und über ein Messwerk auf eine Skala übertragen wird (**Bild 4** und **Bild 5**).

Im fluidtechnischen Bereich werden überwiegend Druckmessgeräte mit Rohrfedern als Messglieder eingesetzt. Gründe dafür sind u. a. die unproblematische Herstel-

lung – auch in großen Stückzahlen – und der große Messbereich der von 0 ... 0,6 bar bis zu 0...10 000 bar reicht. Bei hohen Drücken (ab 1 000 bar) werden Sonderformen der Rohrfeder (**Bild 6a**) wie z. B. Schraubenformfeder verwendet (**Bild 6b**).

Druckmessgeräte mit Plattenfeder

Plattenfedern sind Membranen, die am Rand kreisförmig eingespannt sind. Bei einseitiger Belastung durch Druck entsteht eine elastische Durchbiegung, deren Weg im Mittelpunkt der Membrane bei Manometern über ein Zeigerwerk in eine Drehbewegung umgewandelt wird.

Durch ihre relativ große Arbeitsfläche haben Plattenfedern entsprechend große Richtkräfte. Deshalb sind sie auch besonders für Messungen in niedrigen Druckbereichen geeignet, die allgemein zwischen 0...16 mbar und 0...40 bar liegen (**Bild 7**).

Zu den positiven Eigenschaften der Plattenfedern gehören die weitgehende Unempfindlichkeit gegen mechanische Erschütterungen und pulsierende Belastung. Außerdem können sie Drücke in zähflüssigen und stark verschmutzten Medien messen. Zu diesem Zweck wird die untere Einspannung, das Plattenfederunterteil, als offener Flansch ausgebildet.

Druckmessgeräte mit Kapselfeder

Da Kapselfedern eine Sonderform der Plattenfedern sind, haben sie mit diesen viele messtechnische Merkmale gemeinsam. Um eine Kapselfeder herzustellen werden zwei Plattenfedern zu einer geschlossenen Membrandose zusammengelötet. Die Kapselfeder wird nur am zentrisch angeordneten Druckanschluss vom Gehäuse festgehalten, so dass beide Plattenfedern frei beweglich sind. Dadurch erhält man den doppelten Federweg. Und in Kombination mit bestimmten Membranmaterialien können so selbst Drücke bis zu 0 ... 2,5 mbar messtechnisch erfasst werden (**Bild 8**).

Druckmessgeräte für Differenzdruckmessung

Um die Differenz zwischen zwei unterschiedlichen Drücken zu messen, sind zwei geschlossene Messkammern erforderlich, die durch ein Messglied (Plattenfeder, Kapselfeder, Rohrfeder, usw.) voneinander getrennt sind.

Das Messglied bleibt in Ruhe, wenn beide zu messenden Drücke p_1 und p_2 gleich sind. Der bei ungleicher Druckbeaufschlagung entstehende Federweg ist druckproportional und verhält sich entsprechend der Formel:

$$\Delta p = p_1 - p_2$$

Differenzdrücke können je nach Aufbau des Messgeräts und der Wahl des Messelements von 0,5 mbar bis 1 000 bar liegen und je nach Messbereich und Messglied Betriebsdrücken bis zu 1 000 bar standhal-

ten. Das gängigste Messelement für Differenzdruck ist die Plattenfeder. Hier werden die üblichen Differenzdruckmessbereiche 0 ... 16 mbar bis 0 ... 40 bar mit Betriebsdrücken bis zu 400 bar zur Anzeige gebracht (Bild 9).

Messgenauigkeit

Jedes Ergebnis einer Messung ist fehlerbehaftet, weil Messgegenstände, Messgeräte und Messverfahren nicht vollkommen sind. Deshalb kann der wahre Wert einer Messgröße nie exakt angegeben werden, sondern nur innerhalb gewisser Grenzen, die auch von Umwelteinflüssen und von persönlichen Eigenschaften beeinflusst werden. Da es also nicht möglich ist, ein fehlerfreies Objekt mit der Anzeigegenauigkeit „0“, d. h. (unendliche Messgenauigkeit) zu messen, ist die Kenntnis der Fehlergröße unbedingt erforderlich.

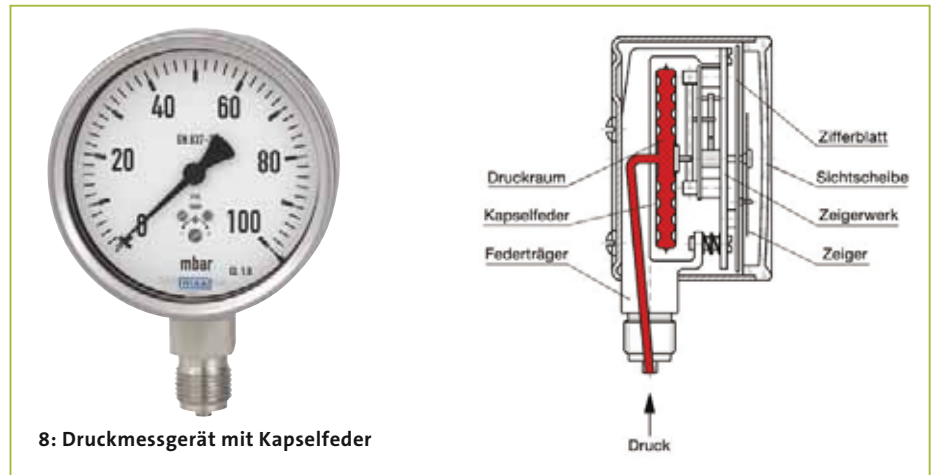
Messfehler

Ein Messfehler ist die Differenz zwischen dem richtigen Wert und dem angezeigten Wert. Das bedeutet ein Fehler ist die Differenz aus falschem Wert und richtigem Wert.

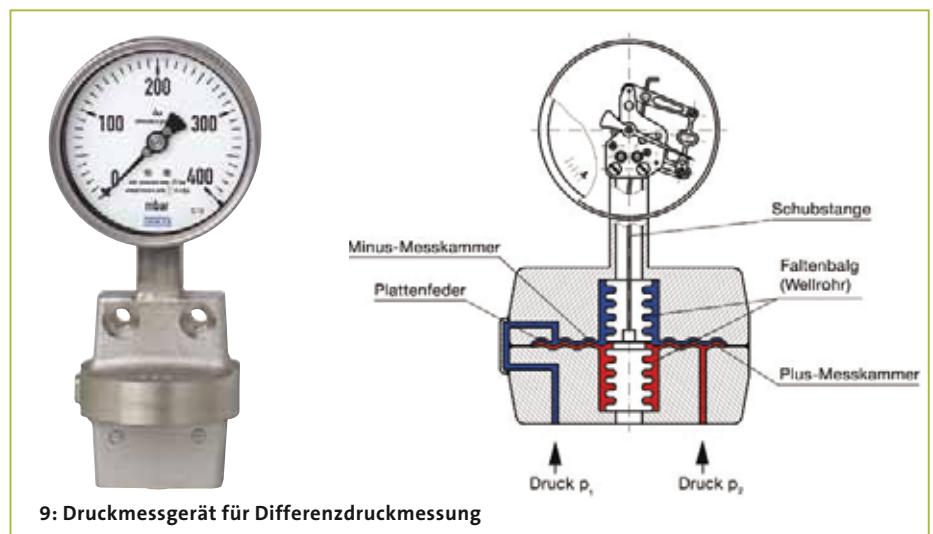
$$\text{Messfehler: } f = p_{\text{falsch}} - p_{\text{richtig}}$$

Diese Abweichung vom richtigen Wert ist für jede Messung von größter Bedeutung. Messfehler entscheiden, ob Messergebnisse brauchbar sind und ob sich Entschlüsse, die aufgrund von Messungen gefasst werden, auf sichere oder unzuverlässige Grundlagen stützen.

Die Genauigkeit eines Messgerätes wird üblicherweise durch die Angabe des zulässigen Messfehlers gekennzeichnet. Beim Manometer erfolgt das in der Regel mit der Klassenangabe auf dem Ziffernblatt. Bei dem



8: Druckmessgerät mit Kapselfeder



9: Druckmessgerät für Differenzdruckmessung

möglichen Messfehler wird prinzipiell zwischen zwei Fehlerangaben unterschieden:

- Messfehler-Angabe bezogen auf den Momentanwert der Messung,
- Messfehler-Angabe bezogen auf den Endwert des Messbereiches.

Wird der zulässige Messfehler mit $\pm 1\%$ angegeben, so hat das folgende Bedeutung:

Der richtige Wert darf vom abgelesenen Messwert bezogen auf den Momentanwert oder auf den Endwert des Messbereiches, nicht mehr als 1% über- oder unterschritten werden. Bei federelastischen Manometern wird die Messunsicherheit auf den Skalenendwert bezogen und als prozentualer Fehler des Messwertes angegeben.

80°
CELSIUS

0,5
METER PRO
SEKUNDE

102
TONNEN

700
BAR

552
PFERDE
STÄRKEN

Hallite

Fenner Advanced Sealing Technologies

0,1 MILLIMETER ...

**... DIE TÄGLICH AUFS NEUE BEWEISEN,
DASS NICHT DIE GRÖSSE ENTSCHIEDET.**

Gerade wenn es darauf ankommt, brauchen Sie einen Partner auf den Sie sich verlassen können. Kombinieren Sie höchste Qualität mit individuellem Service und finden Sie mit uns Ihre maßgeschneiderte Dichtungslösung.

4.-8. April 2011
Halle 20, Stand C 07

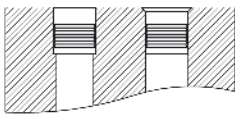
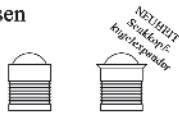
Hallite – seit über 100 Jahren Spitze in der Dichtungstechnologie für die Hydraulik. · www.hallite.com · seals@hallite.de · Member of the global group **Fenner**



Blockverschlußtechnik:



- NEUHEIT / Patent angemeldet
- * **Senkkopf-Kugelerweiterer***
- Kugelerweiterer
- Verschlusschrauben mit Profildichtung
- Messverschraubungen
- Düsen

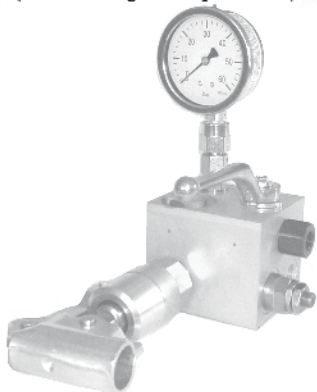


Zahnradpumpen:



Blockfertigung:

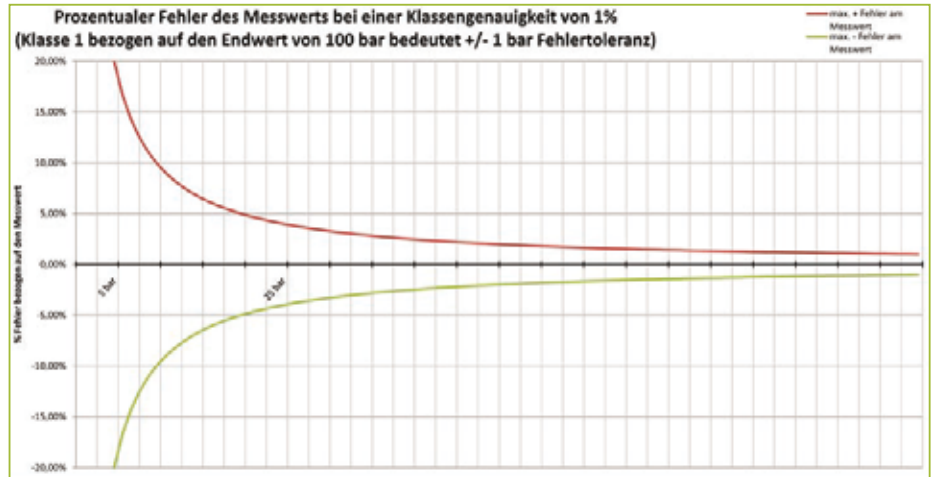
- Steuerblöcke aus Alu, Guss und Stahl n. Zeichnung o. Schaltpl.
- Alu eloxiert oder chromatiert
- Guss und Stahl verzinkt
- Sammelanschlussplatten für Cetop Ventile
- Herstellung von Blocksystemen (einbaufertige Komponenten)



Bitte fragen Sie Ihren Bedarf an hydraulischen Komponenten bei uns an !

Industriebedarf Krüger GmbH
 Pudelhofsweg 3, D-27386 Brockel
 Tel.: 0 42 66 / 9 41 05 Fax.: 9 41 06
 info@khk-brockel.de
 www.khk-brockel.de

Wir stellen aus: Hannover Messe, Halle 20 - Stand D04



10: Prozentualer Messfehler



11: Feinmessmanometer

Für die Errechnung des prozentualen Anzeigefehlers gilt:

$$\text{prozentualer Fehler} = \left(\frac{p_{\text{falsch}} - p_{\text{richtig}}}{p_{\text{richtig}}} \right) * 100 [\%]$$

Die sich aufgrund dieser Beziehung ergebende Fehlerkurve zeigt den zulässigen prozentualen Messfehler (Bild 10), z. B. bei einem Manometer mit dem Anzeigebereich 0...100 bar und der Genauigkeitsklasse 1 (zulässiger prozentualer Fehler ± 1 % vom Skalendwert). Es wird deutlich, wie der zulässige Fehlerwert im unteren Bereich progressiv ansteigt, letztlich sogar den zu messenden Wert übersteigt und schließlich unendlich groß wird.

Genauigkeitsklassen nach EN 837

Bei der Prüfung der Messgenauigkeit muss ein Druckmessgerät verwendet werden, dessen Messgenauigkeit mindestens viermal besser ist, als die des zu prüfenden Druckmessgerätes (d. h. dessen Fehlergrenzen dürfen höchstens 1/4 der Fehlergrenzen des zu prüfenden Druckmessgerätes betragen). Das zur Prüfung verwendete Druckmessgerät muss auf ein nationales oder internationales Normal rückverfolgbar sein. Das Prüfverfahren vergleicht entweder

ausgewählte Anzeigen mit den erforderlichen Drücken oder ausgewählte Drücke mit den sich daraus ergebenden Anzeigen des zu prüfenden Druckmessgerätes. Die Prüfung muss bei steigendem und bei fallendem Druck durchgeführt werden.

Die Prüfpunkte sind in folgender Anzahl gleichmäßig über den gesamten Skalenumfang zu verteilen:

- Genauigkeitsklassen 0,1, 0,25 und 0,6: mindestens zehn Prüfpunkte;
- Genauigkeitsklassen 1, 1,6, und 2,5: mindestens fünf Prüfpunkte;
- Genauigkeitsklasse 4: mindestens vier Prüfpunkte.

Jeder Punkt muss bei steigendem und fallendem Druck geprüft werden. Der Skalendwert ist ein Prüfpunkt. Der Nullpunkt ist nur Prüfpunkt, wenn er frei ist. Der angezeigte Messwert wird nach leichtem Klopfen am Gehäuse des Druckmessgerätes abgelesen. Die abgelesenen Werte werden zwischen 1/4 und 1/10 des Teilstrichabstandes interpoliert.

Die Anwendung der Druckmessgeräte kann aufgrund der entsprechenden Genauigkeitsklassen etwa so beschreiben werden:

Prüfmanometer: Nach dem Prinzip des Kolbenmanometers; Genauigkeiten besser als 0,1 % bezogen auf den Momentanwert: genaue Messungen beim Prüfen und Eichen von Druckmessgeräten.

Feinmessmanometer: Genauigkeitsklasse 0,1 bis 0,6 % bezogen auf den Endwert: genaue Messungen in Laboratorien, Prüfeinrichtungen und Überprüfen von Messgeräten anderer Messklassen (Bild 11).

Betriebsmanometer: Genauigkeitsklasse 1,0 bis 1,6 % bezogen auf den Endwert: Betriebsmessungen mit transportablen Messeinrichtungen, Prüfstandausstattungen bei einfachen Prüfvorgängen und Einsatz bei Maschinen und Produktionsanlagen mit erhöhten Anforderungen an die Messgenauigkeit. Genauigkeitsklasse 2,5 bis 4,0 % bezogen auf den Endwert: Einsatz bei Anlagen, deren Überwachung keine größeren Anforderungen an die Messgenauigkeit stellen.

◀ Weitere Informationen www.vfv1.de/26949320

(wird fortgesetzt !)