

Berichte.

Aufstellung einer Druckskale und deren experimentelle Erprobung bis 20000 at.

Von H. EBERT.

(Deutsches Amt für Maß und Gewicht, Berlin und Weida i. Thür.)

Mit 15 Textabbildungen.

(Eingegangen am 1. August 1948.)

A. Einführende Betrachtungen.

1. Einleitung.

Die Messung von Drucken bedarf wie die Messung jeder anderen physikalischen Größe bestimmter Festsetzungen.

Außer Festlegung des Begriffes selbst muß das Meßverfahren angegeben werden. Dazu sind nicht nur Vereinbarungen über die Verfahren, sondern auch über die zu benutzende Einheit notwendig.

Von den Zustandsgrößen der Thermodynamik sind die notwendigen Festsetzungen bezüglich des spezifischen Volumens und der Temperatur getroffen worden. Es fehlen aber in gleich ausführlicher und gründlicher Form solche Festsetzungen für die 3. thermodynamische Zustandsgröße, den Druck.

2. Begriffsbestimmung.

Druck ist das Verhältnis einer auf eine kleine Fläche drückenden Kraft zu der Größe der Fläche (Kraft je Flächeneinheit, siehe auch Normblatt DIN-AEF 1314). Dabei ist diese Fläche nur einseitig belastet. Mit dem Zusatz „drückend“ soll die Tatsache hervorgehoben sein, daß die Kraft senkrecht zur Fläche hin wirkt. Dadurch, daß die Fläche selbst als „klein“ angenommen wird, soll die gleichmäßige Verteilung der Kraft über der Fläche gesichert sein.

Dieser Druck wird auch „absoluter Druck“ genannt. Von ihm werden unterschieden der Über- und der Unterdruck, wenn die gedrückte Fläche beidseitig belastet ist, so daß nur die Differenz der auf Ober- wie Unterseite der Fläche vorhandenen Drucke wirksam ist.

Es wird dann von einem Über- bzw. Unterdruck (oberhalb der Fläche) gesprochen, wenn der oberhalb der Fläche vorhandene Druck größer bzw. kleiner ist als der unterhalb der Fläche vorhandene, der Bezugsdruck. Die analoge Festsetzung gilt für die untere Seite der Fläche.

3. Einheiten des Druckes.

Da gemäß Begriffsfestlegung der Druck gleich Kraft durch Fläche ist, ergibt sich für seine Einheit entweder

$$\text{dyn/cm}^2 \left(= \text{ein Mikrobar} = 10^4 \frac{\text{dyn}}{\text{m}^2} \right)$$

oder

$$\text{kp/cm}^2 \left(= \text{eine technische Atmosphäre} = \text{at} \right),$$

wenn das Kilopond als Einheit der Kraft¹ genommen wird.

Es werden daneben noch Einheiten des Druckes verwendet, die sich durch den Gebrauch der auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren beruhenden Flüssigkeitsmanometer eingebürgert haben, indem die den zu messenden Druck das Gleichgewicht haltende Flüssigkeitshöhe angegeben wird. So wird der

¹ Siehe Amtsblatt der PTB 15. 40 (1949).

Druck einer Quecksilbersäule von 1 mm Höhe bei 0° und dem Normwert der Fallbeschleunigung 1 Torr genannt.

Es gelten die Beziehungen:

$$1 \text{ Bar} = 1,01972 \text{ kp/cm}^2 \text{ (at)} = 750,06 \text{ Torr},$$

$$760 \text{ Torr} = 1 \text{ atm (phys. Atmosphäre)}.$$

4. Druckerzeugung.

Hergestellt werden allseitige Drucke — nur diese sollen hier betrachtet werden — je nach dem Verhalten des zu komprimierenden Stoffes auf verschiedene Art. Bei Erzeugung von Drucken in Gasen, deren Zusammendrückbarkeit besonders groß ist,

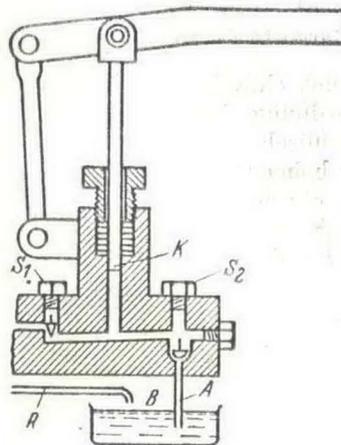


Abb. 1. Druckpresse nach CAILLETET als Beispiel einer Ventilpresse. A Ansaugstutzen; B Flüssigkeitsvorratsgefäß; R Rückfluß; S₁ Druckventil; S₂ Saugventil.

werden meist Vorrichtungen verwendet, die durch häufig wiederholbare Hübe die für das Zusammendrücken notwendige zusätzliche Gasmenge bequem nachliefern: Kompressoren.

Bei Erzeugung von Drucken in Flüssigkeiten, deren Zusammendrückbarkeit gegenüber der von Gasen sehr viel geringer ist, sind 3 Arten von Vorrichtungen (Pressen) am verbreitetsten im Verbrauch:

1. Ventilpresse,
2. Schraubenpresse (Druckschraube),
3. hydraulische Presse.

Die Ventilpresse ist mit 2 Ventilen (am besten Kugelventilen) — einem Saug- und einem Druckventil — ausgestattet. Ein mittels Stopfbuchse gedichteter Kolben wird unter Verwendung einer Hebelübersetzung im 2-Takt betätigt (Ansaugen und Kompression). Die Vorrichtung (s. Abb. 1) hat den Vorteil, daß sie laufend Übertragungsflüssigkeit nachholt. Ist der Versuchsraum zu groß, so wird infolge des schädlichen Raumes zwischen den Ventilen bei höherem Druck die Druckerhöhung je Hub zu gering. Bis in das Jahr 1928, dem CAILLETET mit einer Ventilpresse erreichten Drucke liegen bei etwa 5000 at.

Die Druckschraube (s. Abb. 2) besteht aus einem Kolben, der mittels einer Schraubenspindel in einen geschlossenen Raum hineingedrückt wird, so daß die zu Beginn vorhandene Druckflüssigkeitsmenge auf kleineren Raum zusammengedrückt wird. Hier ist ein Nachholen der Druckflüssigkeit nicht ohne weiteres möglich, wohl aber kann der Druck nach seiner Erzeugung kontinuierlich auf etwas höhere wie niedrigere Werte geändert werden. Die in der PTR/DAMG

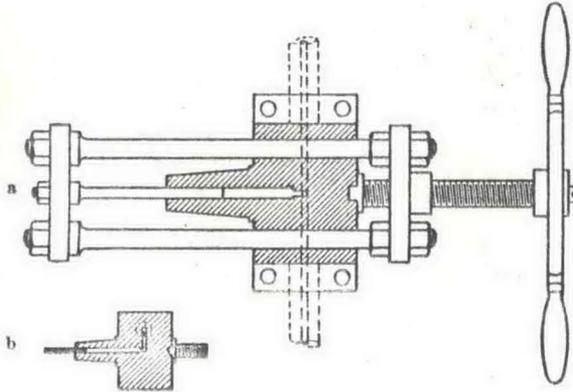


Abb. 2a u. b. Druckschraube, a von oben, b von der Seite gesehen.

mit einer Druckschraube erreichten Drucke sind von der Größenordnung von etwa 2000 at.

Die hydraulische Presse (s. Abb. 3) ist für die Erzeugung sehr hoher Drucke besonders geeignet. Auch bei ihr wird ein Kolben in einen abgeschlossenen Raum hineingedrückt, und zwar durch das Vordrücken eines mit ihm in Verbindung stehenden

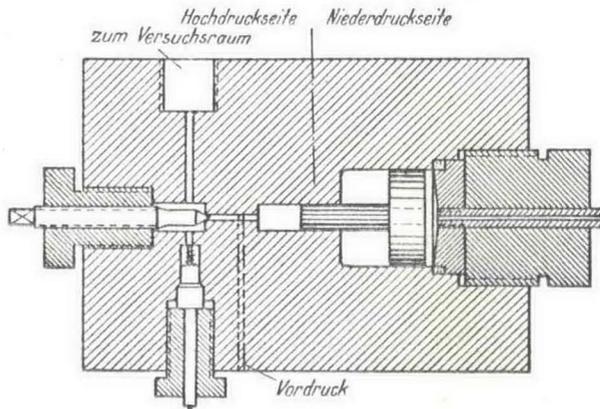


Abb. 3. Schema einer hydraulischen Druckpresse.

zweiten Kolbens von wesentlich größerem Querschnitt. Dieser Kolben größerer Fläche bildet den Abschluß eines Druckraumes (Niederdruckraum), in dem z. B. mittels einer Ventilpresse ein Überdruck hergestellt wird. Unter Einwirkung dieses Überdrucks bewegt sich der große Kolben und treibt den schmaleren vor sich her in den Hochdruckraum hinein. Dieses Prinzip bietet die größte Aussicht, besonders hohe Drucke zu erzeugen.

Es sind aber noch besondere Voraussetzungen zum Erreichen dieses Zieles notwendig. Vor allem sind es Forderungen, die an Material sowie die Form des Hochdruckraumes und an die Druckübertragungsflüssigkeit gestellt werden müssen. Das zum Aufbau einer Presse zu verwendende Material muß hohe Festigkeit aufweisen und darf nicht porös sein. Die Gestalt des Raumes ist so durchzubilden, daß mög-

lichst keine sackgassenartige Stellen entstehen, aus denen Gase schwer zu entfernen sind. Jede zurückbleibende Gasblase aber verhindert infolge ihrer starken Komprimierbarkeit das Erreichen eines hohen Druckes.

Das von dem Kolben nicht ausgefüllte und für den Versuch nicht benötigte Volumen — also der schädliche Raum — ist so klein wie möglich zu wählen. Der Hochdruckraum, der den Versuchskörper enthält, wird zwecks gleichmäßiger Übertragung des Druckes gewöhnlich mit einer Flüssigkeit gefüllt, die je nach der gewünschten Höhe des zu erreichenden Druckes auszusuchen ist. Zweckmäßig wird eine solche Flüssigkeit gewählt, die bei mittlerem Druck noch gut liquid bleibt, die bei dem höchsten Meßdruck nicht teigig wird, wohl aber mit steigendem Druck an Zähigkeit zunimmt, damit die Abdichtung

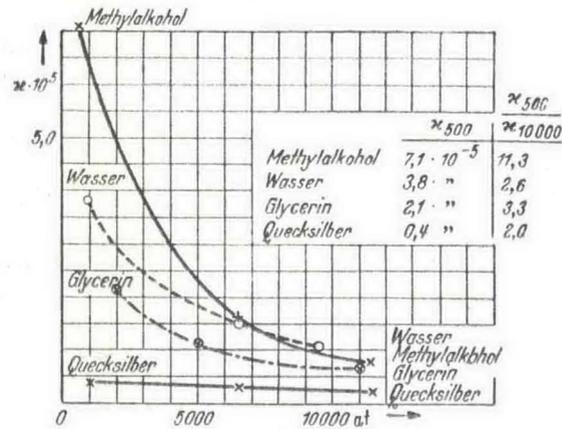


Abb. 4. Kompressibilität einiger Flüssigkeiten in Abhängigkeit vom Druck.

des Kolbens erleichtert wird. Dieses Teigigwerden der Druckflüssigkeit ist wegen des schlechten Druckausgleiches durch sie und in ihr sehr zu beachten.

Auch soll die Übertragungsflüssigkeit eine gewisse Schmierfähigkeit besitzen. Ist dies nicht der Fall, so sind die beweglichen Teile besonders zu schmieren.

Ferner ist bei der Auswahl der Flüssigkeit darauf zu achten, daß deren Kompressibilität gering ist. Andernfalls würde ein beträchtlicher Teil des Hochdruckraumes allein für die Raumgewichtsänderung der Flüssigkeit benötigt werden und für den eigentlichen Zweck der Druckerzeugung verlorengehen. Wie in Abb. 4 gezeigt, nimmt die Kompressibilität von Flüssigkeiten mit dem Druck sehr stark ab. Hat eine Übertragungsflüssigkeit bei niedrigeren Drucken eine hohe Kompressibilität, so kann den dadurch hervorgerufenen Schwierigkeiten durch eine geeignete, im nächsten Absatz dargelegte Versuchsführung begegnet werden. Zur Erläuterung mag als Zahlenbeispiel angegeben werden, daß bei üblicher Kompressibilität $\frac{1}{3}$ des Volumens bei Erhöhung des Druckes von 1 auf 12000 at allein durch die Raumgewichtsveränderung der Übertragungsflüssigkeit benötigt wird.

Da es im wesentlichen die niedrigeren Drucke sind, bei denen die Flüssigkeit stark kompressibel ist, kann man den Versuch in der Weise durchführen, daß man zwecks Überbrückung dieses Gebietes zu Beginn des Versuches einen Vordruck herstellt. Dieser liegt zweckmäßigerweise zwischen 3000 und 5000 at. Man stellt sich zunächst einen niedrigeren Vordruck her, setzt dann die Niederdruckseite der Presse in

Betrieb,
druck z
Endl
der Dr
eine sol
Presse c
Zeit nie

B.

Für
net sich
durch d

Abb. 5. Me
(Hg-) Man
ometersch

Kraft d
Gleichg
weiten
werden.
Ablesur
(s. unte
meter s

Das
Quecks
werke c
einen M
lange S
bare Al
der ober
Maßstäl

Da
Temper
weg, K
für das
erfüllba
Fundam
allenfall

Für
verfahre
Die für
müssen
schlüssel
gibt als

Betrieb, um im Versuchsraum den gewünschten Hochdruck zu erzeugen.

Endlich ist bezüglich der besonderen Eigenschaften der Druckübertragungsflüssigkeit anzustreben, daß eine solche verwendet wird, die die Metallteile der Presse chemisch nicht angreift und die im Laufe der Zeit nicht harzig wird.

B. Fundamentale Hochdruck-Meßverfahren.

B₁. Die Meßgeräte.

1. Flüssigkeitsmanometer.

Für die Fundamentalmessung eines Druckes eignet sich nur das Flüssigkeitsmanometer, bei dem die durch den Druck an einer Fläche hervorgebrachte

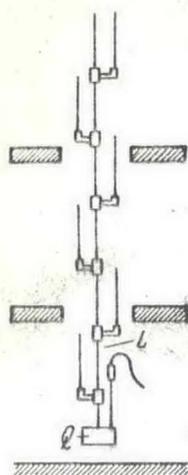


Abb. 5. Mehrstöckiges Flüssigkeits- (Hg-) Manometer. L langer Manometerschenkel; Q Quecksilber-vorratsgefäß.

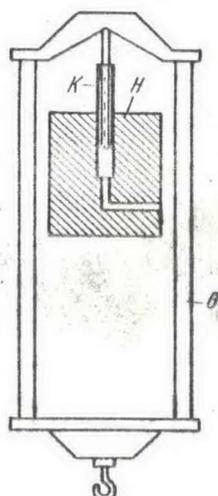


Abb. 6. Prinzip eines Kolbenmanometers (unterschallig). G Gehänge; H Hohlzylinder; K Kolben (Stempel).

Kraft durch das Gewicht einer Flüssigkeitssäule das Gleichgewicht gehalten wird. Flüssigkeitsmanometer weiten Meßbereich müssen mit Quecksilber gefüllt werden. Wegen der Vergleichbarkeit verschiedener Ablesungen müssen ferner die üblichen Korrekturen (s. unter B₂) angebracht werden. Quecksilbermanometer sind bis etwa 400 at verwendet worden.

Das der PTR/DAMG zur Verfügung stehende Quecksilbermanometer [1], das durch mehrere Stockwerke eines Gebäudes hindurchgeführt wurde, hat einen Meßbereich von 25 at (Schema s. Abb. 5). Der lange Schenkel aus Stahlrohr besitzt sechs abschließbare Abzweigungen aus Glas, in denen der Stand der oberen Quecksilberkuppe beobachtet und mittels Maßstäben ausgemessen wird.

Da verschiedene zusätzliche Forderungen, wie Temperaturkonstanz über den langen Schenkel hinweg, Kenntnis der Kompressibilität als Korrektur für das Raumgewicht des Quecksilbers, nur schwer erfüllbar sind, werden Quecksilbermanometer für Fundamentalmessungen nur bis zu Drucken von 50, allenfalls 100 at verwendet.

2. Kolbenmanometer.

Für sehr hohe Drücke sind bisher keine Meßverfahren bekannt, die als fundamental gelten können. Die für dieses Gebiet benutzten Druckmeßgeräte müssen daher an ein Flüssigkeitsmanometer angeschlossen werden. Für die Messung solch hoher Drucke gilt als zuverlässigstes Gerät das Kolbenmanometer

(Druckwaage), bei dem der zu messende Druck aus der Kraft berechnet wird, die auf die Stirnfläche eines Kolbens wirkt, welcher in einem Hohlzylinder eingeschliffen ist. Es werden Kolbenmanometergattungen unterschieden auf Grund der

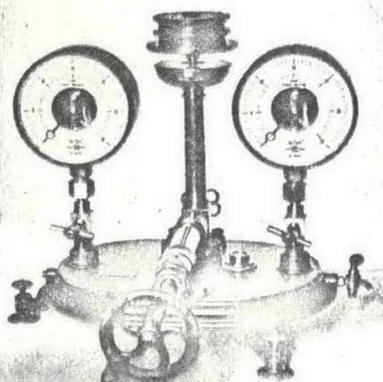


Abb. 7. Manometerprüfgerät mit (oberschalligem) Kolbenmanometer in der Mitte (tellerförmige Verbreiterung des Kolbens [Stempels] zum Tragen der Belastungsgewichte [oberhalb des Kolbens]).

a) Anordnung der Belastungsgewichte.

Der Kolben wird durch Gewichte belastet, und zwar mit Hilfe eines Gehänges (Abb. 6 unterschallig), einer tellerförmigen Verbreiterung des Kolbens selbst

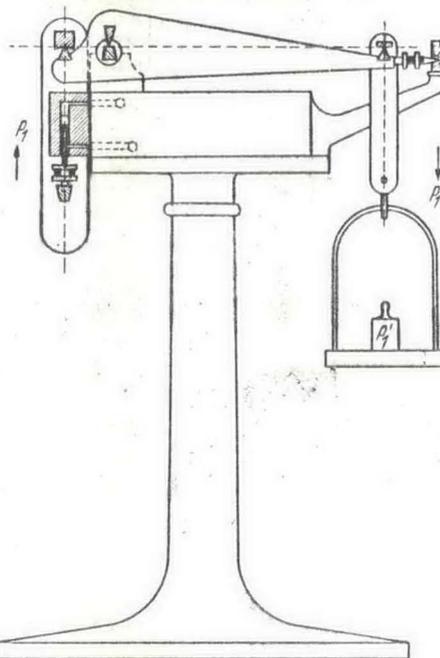


Abb. 8. Gesamtansicht eines Differenz-Kolbenmanometers als Beispiel einer Druckwaage. P, die vom Druck erzeugte, durch Waagebalken übersetzte Kraft; P' die vom Hebelarm wirkende Kraft.

an seinem oberen, aus dem Druckraum herausragenden Ende (Abb. 7, oberschallig) oder eines Hebelarmes (Waagebalken) (Abb. 8, Druckwaage).

b) Kolbenform und Dichtungsart.

Neben der Anordnung der Gewichte in ihrer Lage zum Kolben sind die Form des Kolbens und die Art seiner Dichtung wesentlich.

b₁) Kolbenform.

Während für nicht zu hohe Drücke der Kolben möglichst einfach geformt und verhältnismäßig stabil

gemacht wird (Querschnitt meist 1 cm²), muß man bei höheren Drucken darauf bedacht sein, daß die Zahl der belastenden Gewichtsstücke nicht zu hoch wird. Das kann beispielsweise durch Verwendung eines Hebelarmes erreicht werden, wie das bei der Druckwaage geschieht.

Es ist aber auch möglich, den Querschnitt des Kolbens zu verkleinern ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{20}$ cm²). Diesem Weg ist aber bald eine Grenze gesetzt, da der Kolben dann zu dünn wird.

Um ohne diese Durchmesser verringering einen kleinen Belastungsquerschnitt zu erhalten, hat man auch einen Differentialkolben eingeführt. Dieser hat zwei verschiedene Durchmesser. Der Druck wirkt auf die Differenz der beiden Kolbenflächen, die nun sehr klein gemacht werden kann, ohne daß der Durchmesser des Kolbens selbst zu klein wird.

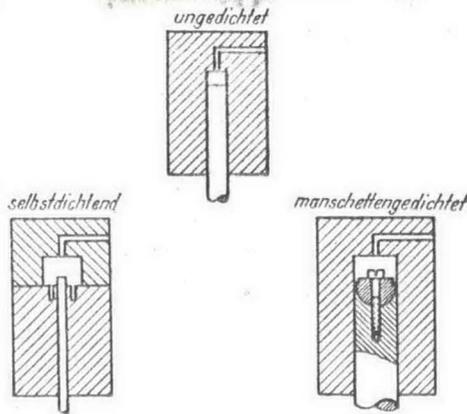


Abb. 9. Die verschiedenen Kolbendichtungen.

Ein Nachteil dieser Kolbenform ist die Tatsache, daß 2 Dichtungen bzw. 2 Einschleifstellen, die zueinander laufen müssen, notwendig sind.

b₂) Kolbendichtung.

α) Ohne zusätzlichen Dichtungstoff. Kann während einer Druckmessung ein geringer Flüssigkeitsverlust in Kauf genommen werden, so ist der Verzicht eines völligen Abdichtens z. B. durch eine Manschette möglich. Es wird alsdann der Kolben besonders sorgfältig in den Hohlzylinder eingeschliffen, so daß der Flüssigkeitsverlust durch Austritt zwischen Kolben und Hohlzylinder auf ein Minimum herabgesetzt wird (ungedichteter AMAGATScher Kolben) (s. Abb. 9, Mitte oben).

β) Mit Manschetten. Zwecks völliger Verhinderung eines Flüssigkeitsaustritts aus dem Spalt zwischen Kolben und Hohlzylinder wird zwischen beiden letzteren eine Manschettendichtung angebracht. Dabei kann die dichtende Manschette entweder am Kolben sitzen — das ist bei den STÜCKRATHSchen Druckwaagen der Fall (s. Abb. 9 rechts unten), — oder am Hohlzylinder.

γ) Mit Nutdichtung. Die Manschettendichtung ist für Drucke oberhalb 2000 at nicht mehr brauchbar. Auch der AMAGATSche Kolben läßt etwa vom gleichen Druck ab zu viel Flüssigkeit durch. Es ist daher auf Vorschlag von BRIDGMAN eine andere Dichtungsart üblich geworden, indem konzentrisch zum Kolben im Hohlzylinder eine Nut gefräst wird, in die hinein der Druck wirken kann. Letzterer preßt die zum Kolben hin bezogene ringförmige Dichtung an den Rand:

Dadurch wird der Spalt zwischen ihm und dem Hohlzylinder mit wachsendem Druck kleiner (Abb. 9 links unten) ja, kann sogar zum völligen Abschluß führen, so daß darauf geachtet werden muß, daß sich der Kolben nicht festfrißt.

B₂. Die an den unter B₁ aufgeführten Druckmeßgeräten anzubringenden Berichtigungen.

1. Flüssigkeitsmanometer.

Die an einem Flüssigkeitsmanometer abgelesenen Höhen sind nur dann untereinander vergleichbar und für die Angabe eines Druckwertes brauchbar, wenn zuvor entsprechende Berichtigungen angebracht worden sind. Diese beziehen sich

a) auf den Einfluß der Temperatur.

Es ist sowohl die Temperatur der Manometerfüllflüssigkeit wie die des Maßstabes zu berücksichtigen. Grundsätzlich wäre auch der Quecksilberdampfdruck zu beachten. Indes ist die dadurch bedingte Berichtigung bei den in Betracht kommenden Temperaturen vernachlässigbar.

Die Temperatur selbst darf höchstens auf ± 0,1° C unsicher bestimmt sein.

a₁) Die Manometerfüllflüssigkeit.

Ist der kubische Wärmeausdehnungskoeffizient der Füllflüssigkeit gleich γ (für Hg ist γ = 0,000182 je 1°), so wird die bei der Temperatur t abgelesene Flüssigkeitshöhe h auf 0° C bezogen durch

$$\frac{h}{1 + \gamma t} = h'_0 \tag{1}$$

oder, unter Vernachlässigung Glieder höherer Ordnung:

$$h(1 - \gamma t) = h'_0. \tag{1a}$$

a₂) Der Maßstab.

Ablesungen am Maßstab sind ebenfalls auf 0° zu beziehen, da das die Bezugstemperatur für die Längeneinheit ist.

Es ist aber dabei auf die bei der Herstellung der Maßstabteilung zugrunde gelegte Temperatur zu achten.

Ist die Maßstabbezugstemperatur 0° C, so muß h₀ mit (1 + βt) multipliziert werden, wo β der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient des Maßstabskalenträgers ist.

Dann gilt näherungsweise:

$$h'_0(1 + \beta t) = h\{1 - (\gamma - \beta)t\}. \tag{2}$$

γ - β ist der sog. scheinbare Wärmeausdehnungskoeffizient der Füllflüssigkeit gegen den des Werkstoffes der Skale. Für Quecksilber gegen Messing ist γ - β = 0,000163 und für Quecksilber gegen Glas = 0,000174 je Grad.

Ist dagegen die Maßstabbezugstemperatur t', so ist der Faktor 1 + β(t - t'). Die Gleichung für die Umrechnung lautet dann

$$h'_0\{1 + \beta(t - t')\} = h\{1 - (\gamma - \beta)t + \beta t'\}. \tag{3}$$

b) Einfluß der Kapillarität.

Da bei der Verwendung von Flüssigkeitsmanometern nicht beliebig weite Röhren verwendet werden können: ist die Berücksichtigung der Kapillarität zu

berücks Manom sonst d die glei

Bei mit un benetzt druck a meter l

Die Schwan schwer der Röh müssen pillarität

c) Einf

Da Beobach zug des Normw werden.

Ferner beschle

g = 9,78

Dabei über de H = 0

Wird ändert Raumge dem Dr menge i

z hat f dem hie h die ab

p =

e) Ist offenes, der HöH je m Hö des Mar

a) Die F. Es s tionen (Angabe damit d gaben d

berücksichtigen. Diese wird unwirksam, wenn beide Manometerschenkel gleiche Weite haben und auch sonst die Versuchsbedingungen in beiden Schenkeln die gleichen sind.

Bei Verwendung von Quecksilber in Manometern mit ungleich weitem Schenkel tritt wegen der Nichtbenetzbarkeit Quecksilber gegen Glas ein Kapillardruck auf, der ein zu niedriges Anzeigen der Manometer bedingt (Kapillardepression).

Die dadurch bedingte Berichtigung ist starken Schwankungen unterworfen und daher in ihrem Wert schwer faßbar. Sie ist ceteris paribus eine Funktion der Röhrenweite und der Randwinkel. Beide Größen müssen gegebenenfalls gemessen werden, um die Kapillaritätsberichtigung zu erfassen.

c) Einfluß der Änderung der Fallbeschleunigung.

Da die Fallbeschleunigung (g) eine Funktion des Beobachtungsortes ist, muß ihre Änderung durch Bezug der gemessenen Flüssigkeitshöhe h auf einen Normwert [2] $g_0 = 9,80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ berücksichtigt werden. Das geschieht durch Formel (3)

$$h_0 = h \cdot \frac{g}{g_0} \quad (4)$$

Ferner kann, sofern keine Sondermessungen der Fallbeschleunigung am Ort vorliegen, angesetzt werden:

$$g = 9,78049 (1 + 0,005288_4 \sin^2 \varphi - 0,0000059 \sin^2 2\varphi - 0,0003 H) \text{ ms}^{-2}. \quad (5)$$

Dabei ist φ die geographische Breite, H die Ortshöhe über dem Meeresspiegel in m. Für $\varphi = 45^\circ$ und $H = 0$ ist $g = 9,80629 \text{ ms}^{-2}$.

d) Einfluß der Raumgewichtsänderung der Flüssigkeit.

Wird die Flüssigkeit einem Druck ausgesetzt, so ändert sie infolge ihrer Kompressibilität (κ) ihr Raumgewicht ρ . Beim Berechnen des Gewichtes der dem Druck das Gleichgewicht haltenden Flüssigkeitsmenge ist für das Raumgewicht ρ anzusetzen

$$\rho = \rho_0 (1 + \kappa \cdot p), \quad (6)$$

κ hat für Quecksilber den Wert $3,7 \cdot 10^{-6}$ je at in dem hier in Betracht kommenden Druckbereich. Ist h die abgelesene Höhe, so ergibt sich für den Druck:

$$p = \frac{\exp(\kappa \rho \cdot h) - 1}{\kappa} = \rho_0 h + \frac{1}{2} \kappa (\rho_0 h)^2 + \dots \quad (6a)$$

e) Abnahme des Luftdruckes mit der Höhe.

Ist das verwendete Flüssigkeitsmanometer ein offenes, so muß die Abnahme des Luftdruckes mit der Höhendifferenz berücksichtigt werden (0,09 Torr je m Höhendifferenz), sofern der Luftdruck am Fuß des Manometers bestimmt wurde.

2. Kolbenmanometer.

a) Die Formeln für die anzubringenden Berichtigungen.

Es sollen nunmehr die Formeln für die Korrekturen (Berichtigungen) angegeben werden, die an den Angaben der Kolbenmanometer anzubringen sind, damit der Druck richtig gemessen wird. Unter Angaben des Kolbenmanometers sind dabei jene Werte

zu verstehen, die man bei der Annahme errechnet, daß der Kolben wirklich genau den vorgesehenen Querschnitt hat, daß sich Kolben und Zylinder unter Druckeinwirkung nicht ändern, daß — bei der Druckwaage — das Hebelarmverhältnis tatsächlich den gewünschten Betrag hat. Die bekannten Berichtigungen der zur Belastung verwendeten Gewichtsstücke sollen bereits berücksichtigt sein.

Es muß aber bei den Kolbenmanometern zur genauen Berechnung des Druckes jener Querschnitt bekannt sein, der während der Messung wirklich belastet wird. Er wird als *wirksamer Querschnitt* bezeichnet.

Es ist die Regel, daß bei manschettengedichtetem Kolben die lichte Weite des Hohlzylinders (bzw. der Durchmesser des Kolbens) maßgebend ist, je nachdem sich die Manschette am Kolben (bzw. am Hohlzylinder) befindet. Der gebräuchlichste Fall bei Kolbenmanometern ist der mit Manschette am Kolben.

Beim AMAGATschen Kolben berechnet sich der Querschnitt als arithmetisches Mittel zwischen Kolben- und Hohlzylinderquerschnitt.

Für den BRIDGMANSchen Kolben sind besondere Überlegungen notwendig.

Im Falle des manschettengedichteten Kolbens (Manschette am Kolben selbst) erhält man einen Anhaltspunkt über den Wert des Querschnittes beim Überdruck 0, wenn man unter Beachtung besonderer Maßnahmen den Hohlzylinder mit Quecksilber auswägt, seine Länge bestimmt und daraus den Querschnitt errechnet [4].

Wenn auch auf diesem Wege der Wägung ein Kolbenmanometer zu einem absoluten Normalgerät gemacht werden könnte, so ist die damit erreichte Genauigkeit — vor allem auch wegen des Auftretens einer weiteren Korrektur — nicht sehr hoch. Es hat sich aber durch Vergleich mehrerer Druckwaagen, deren wirksame Querschnitte in der angegebenen Weise bestimmt werden, gezeigt, daß dieses Vergleichsverfahren dem des Wägevorganges vorzuziehen ist.

a₁) Manschettengedichteter Kolben.

Ist nun die Belastung einer Druckwaage am langen Hebelarm B , so wäre, falls das Hebelverhältnis $= w$ und die lichte Weite des Hohlzylinders $= q_0$ (cm^2) sind, der Druck

$$p = \frac{w \cdot B}{q_0} \text{ (kp/cm}^2\text{)}. \quad (7)$$

Dabei ist darauf zu achten, daß auch wirklich alle Belastungsstücke (z. B. auch das Gewicht der Kolben) in Rechnung gesetzt sind. Setzt man nun statt w den Wert $w + \Delta w$ und statt q_0 den Wert

$$q_0 + \Delta' q_0, \quad (7a)$$

so ist der Druck

$$p' = \frac{(w + \Delta w) \cdot B}{q_0 + \Delta' q_0} \approx \frac{w \cdot B}{q_0} \left(1 + \frac{\Delta w}{w} - \frac{\Delta' q_0}{q_0} \right) = p + k_0. \quad (7b)$$

Die Korrektur ist also:

$$k_0 = + \left(\frac{\Delta w}{w} - \frac{\Delta' q_0}{q_0} \right) \cdot p. \quad (8)$$

ein in p lineares Glied. Dabei sind nur die Glieder, die klein von 1. Ordnung sind, berücksichtigt.

Es ist aber noch eine weitere Berichtigung anzubringen, die sich aus dem elastischen Verhalten des zur Herstellung des Hohlzylinders verwendeten Werkstoffes ergibt.

Der Hohlzylinder (s. Abb. 10) dehnt sich unter Druck. Die Formel für die Dehnung des Inneren eines Hohlzylinders, der wie im vorliegenden Falle nur radial beansprucht wird, lautet nach GRASHOF [5]

$$\varepsilon_1 = \frac{p}{E} \frac{r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \left(\frac{m+1}{m} \cdot \frac{r_a^2}{r_i^2} + \frac{m-1}{m} \right) = \frac{p}{E} \cdot K, \quad (9)$$

wobei p der Innendruck, E der Elastizitätsmodul, r_i der innere, r_a der äußere Radius des Hohlzylinders und m das Verhältnis der Längsdehnung zur Quer-

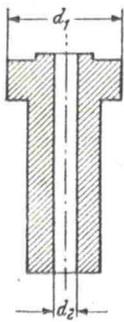


Abb. 10. Form eines Hohlzylinders bei der STÜCKRATHSchen Druckwaage
 $d_1 = 2r_a$
und $d_2 = 2r_i$.

kontraktion ($\sim 10/3 = \frac{1}{\mu}$ Poisson'sche Zahl) ist.

Die Formel (9) hat zur Voraussetzung, daß die Dehnungen innerhalb der Proportionalitätsgrenze bleiben.

Da die Flächendehnung gleich dem Doppelten der Längsdehnung gesetzt werden kann, so kann für den Querschnitt des Hohlzylinders in Erweiterung des Ansatzes (7a) geschrieben werden:

$$q_0 = q_0 + \Delta' q_0 + \Delta'' q_0, \quad (10a)$$

wo

$$\Delta'' q_0 = + 2 \varepsilon_1 q_0$$

ist. Alsdann wird

$$p'' = p + p \left(\frac{\Delta w}{w} - \frac{\Delta' q_0}{q_0} \right) - p \cdot 2 \varepsilon_1 = p + k_0 + k_1, \quad (10b)$$

$$k_1 = - 2 \varepsilon_1 p = - \frac{p^2}{E} \cdot \frac{2 r_i^2}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \left(1,3 \frac{r_a^2}{r_i^2} + 0,7 \right) \left. \vphantom{\frac{p^2}{E}} \right\} \quad (10c)$$

$$= - \frac{K \cdot p^2}{E}.$$

Es kommt also noch ein in p quadratisches Glied hinzu.

Damit sind die Berichtigungen für die manschettedichteten Kolbenmanometer (Manschette am Kolben) erledigt.

a₂) AMAGATScher Kolben.

Außer der Berichtigung $\Delta' q_0$ ist ebenfalls eine Dehnungskorrektur $\Delta'' q_0$ anzubringen. Letztere setzt sich aber im Fall a₂ aus 2 Teilen zusammen: Der Dehnung des Hohlzylinders und der Formänderung des Kolbenquerschnittes. Im Falle der elastischen Druckbeeinflussung des Kolbens sind wiederum 2 Beiträge zu beachten. Einmal wird der Kolben unter der Einwirkung der belastenden Gewichtsstücke verformt und außerdem, weil durch den Spalt zwischen Kolben und Zylinderinnenwand Flüssigkeit austritt, durch einen zentripetalen Druck zusammengedrückt. Das Letztere ergibt eine Querschnittsverringeringung des Kolbens.

Die Verformung durch die Einwirkung der belastenden Gewichtsstücke kann sich im Sinne sowohl einer Vergrößerung wie einer Verringerung des Kolbenquerschnittes zeigen, je nach der Richtung, in der die Gewichtsstücke wirken, ob sie am Kolben ziehen oder ihn stauchen.

Es ist allgemein anzusetzen:

$$q = q_0 + \Delta' q_0 + \Delta'' q_0, \quad (11a)$$

wo

$$\Delta'' q_0 = \frac{+ 2 \varepsilon_1 q_0 \pm 2 \varepsilon_2 q_0 - 2 \varepsilon_3 q_0}{2} = \frac{(\varepsilon_1 \pm \varepsilon_2 - \varepsilon_3) q_0}{2}. \quad (11b)$$

ε_1 rührt von der Hohlzylinderdehnung her, ε_2 vom Stauchen oder vom Strecken des Kolbens und ε_3 vom Komprimieren des letzteren. Die 3 Anteile also verteilen sich auf Zylinder sowie Kolben, und zwar ε_1 auf Zylinder, ε_2 und ε_3 auf Kolben. Für den wirk-samen Querschnitt aber kommt beim AMAGATSchen Kolben das arithmetische Mittel in Betracht, daher die 2 im Nenner der Formel (11b).

Es ist

$$\varepsilon_2 = \frac{p}{E} \cdot \mu, \quad (11c)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1 - \mu}{E} \cdot p. \quad (11d)$$

ε_2 und ε_3 zusammen bewirken eine Querschnitts-änderung von

$$\pm \varepsilon_2 - \varepsilon_3 = \pm \frac{p}{E} \cdot \mu - \frac{p}{E} (1 - \mu) \left. \vphantom{\frac{p}{E}} \right\} \quad (11e)$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} - \frac{p}{E} (1 - 2\mu) = - \frac{\kappa}{3} \cdot p \\ - \frac{p}{E} \end{array} \right.$$

(κ = kubischer Kompr. Koeff.).

Daraus ergibt sich

$$p'' = p - p (\varepsilon_1 \pm \varepsilon_2 - \varepsilon_3) = p + k_3, \quad (12a)$$

$$k_3 = - p (\varepsilon_1 \pm \varepsilon_2 - \varepsilon_3) = \frac{p^2}{E} (k \pm \mu - 1 + \mu) \left. \vphantom{\frac{p^2}{E}} \right\} \quad (12b)$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} - \frac{p^2}{E} (k - 1) \\ - \frac{p^2}{E} (k - 1 + 2\mu). \end{array} \right.$$

a₃) BRIDGMANScher Kolben (s. Abb. 11).

Bei A: wirksame Querschnittsänderung:

$$- \frac{2\kappa}{3} \cdot p = - \frac{2}{3} \cdot \frac{1 - 2\mu}{E} \cdot p, \quad (13)$$

bei B: für Kolbenradius r_0 :

$$r = r_0 \left(1 + \frac{p \mu}{E} \right), \quad (14a)$$

für Zylinder: Zylinderradius R :

$$R = R_0 (1 - a p). \quad (14b)$$

Dabei ist a eine vom Elastizitätsmodul des Zylindermaterials und von den Abmessungen abhängige Größe.

Spalt s_0 zwischen Kolben und Zylinder wird bei p_0 geschlossen; also

$$r_0 \left(1 + \frac{p_0}{E} \right) = (r_0 + s_0) (1 - a p_0); \quad (14c)$$

$$a = \frac{E s_0 - p_0 r_0 \mu}{E p_0 (r_0 + s_0)}, \quad (14d)$$

effektiver Radius

$$\frac{r + R}{2} = \frac{r_0 + R_0}{2} \left(1 + \frac{\mu \pm 2 a E p}{2 E} \right), \quad (14e)$$

also Änderung der Fläche:

$$+ \frac{\mu - a \cdot E}{E} \cdot p. \quad (14)$$

Wirksam soll nun das arithmetische Mittel von (13) und (14) sein,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\mu - a E}{E} \cdot p - \frac{2}{3} \frac{1 - \mu}{E} p &= \frac{p}{2E} \left\{ \mu - aE - \right. \\ - \frac{2}{3} (1 - \mu) \left. \right\} &= \frac{p}{6E} (3\mu - 3aE - 2 + 2\mu) \\ &= \frac{p}{6E} (5\mu - 3aE - 2) = \frac{p}{E} \cdot k', \end{aligned} \right\} (15a)$$

$$k' = \frac{1}{6} (5\mu - 3aE - 2). \quad (15b)$$

Dann ist die Berichtigung

$$k_4 = - \frac{p^2}{E} \cdot k'. \quad (15)$$

a₄) Differentialkolben (ungedichtet).

Setzt man aus a₂) sowohl für den dicken wie für den dünnen Teil des Differentialkolbens die Korrektur k₃ ein, so ergibt sich, daß in diesem Falle als Berichtigung k₃ selbst anzubringen ist, weil die in a₂) durchgeführte Überlegung auch jetzt gültig ist, sofern man sie auf die belastete Fläche, also q₂ - q₁ bezieht.

a₅) Differenzkolben (doppelgedichtet bei A und B). (Abb. 12, s. auch unter b₂β).

Bei f₁: die gleichen Verhältnisse wie im Falle a₁). Also

$$k_{f_1} = - \frac{p^2}{E} \cdot k,$$

bei f₂: Es kommen 3 Einflüsse in Betracht:

α) beim Zylinder

$$k'_{f_2} = - \frac{p^2}{E} \cdot K,$$

β) beim Kolben (durch den Zylinder nach außen führender Teil mit Querschnitt q'₂, er ist nach Ausrieren belastet mit Z),

β₁) Quetschen bewirkt Vergrößerung des wirksamen Querschnittes

$$k''_{f_2} = - 2 \frac{p^2}{E} (1 - \mu),$$

β₂) Stauchen, unter Einwirkung von Z auf q'₂, bewirkt Verminderung des wirksamen Querschnittes

$$k'''_{f_2} = + \frac{2}{E} \cdot \mu \cdot \frac{Z}{f_2}.$$

Insgesamt bei f₂:

$$k_{f_2} = k'_{f_2} + k''_{f_2} + k'''_{f_2} = - \frac{2p^2}{E} \left\{ \frac{K}{2} + 1 - \mu \left(1 - \frac{Z}{f_2 \cdot p} \right) \right\}.$$

Für die Gesamtkorrektur wirken k_{f₁} und k_{f₂} gegeneinander:

$$k_{f_1} - k_{f_2} = \left\{ 1 - \mu \left(1 + \frac{Z}{f_2 \cdot p} \right) \right\} \cdot \frac{2p^2}{E}.$$

b) Experimentelle Prüfung.

Wenn auch die Verformung an Kolben und Zylinder eines Kolbenmanometers weitgehend theore-

tisch beherrscht werden, so ist doch infolge der bei der Ableitung der Verformungsgleichungen zu machenden Voraussetzungen (unter anderem vollkommene Elastizität, Gültigkeit des HOOKESCHEN Gesetzes) eine Unsicherheit vorhanden, die es verhindert, daß Kolbenmanometer als primäre Normale betrachtet werden können. So ist versucht worden — und zwar mit gutem Erfolg — die Formeln a₁) bis a₅) experimentell zu stützen. Je nach der Höhe des Druckes sind dafür verschiedene Verfahren ausgearbeitet worden.

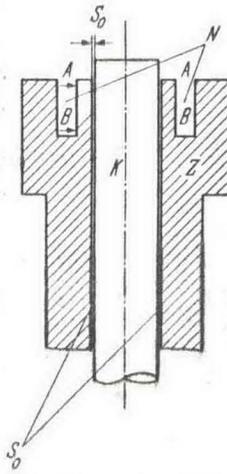


Abb. 11. Schema eines BRIDGMANschen Kolbens. A- und B-Stellen, zum Druckraum hin- bzw. abgewendet; N ringförmige Nut; s, Spalt zwischen Kolben (K) und Zylinder (Z).

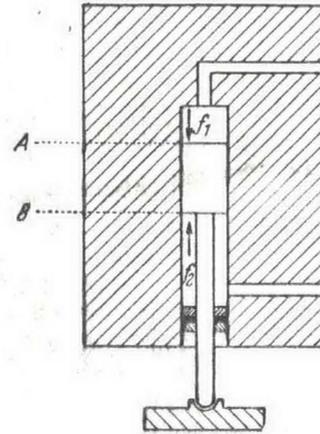


Abb. 12. Doppelt gedichteter (bei A und B) Differenzkolben. f₁ der größere, f₂ der kleinere Querschnitt.

b₁) Unmittelbare Vergleichsverfahren.

α) Bei nicht zu hohen Drucken (etwa 25 at, im Extremfalle allerdings 400 at) sind Kolbenmanometer unmittelbar mit Quecksilbermanometern verglichen worden [6].

Dabei konnten die theoretisch abgeleiteten Berichtigungen experimentell bestätigt werden.

β) Durch Vergleich von Kolbenmanometern untereinander, deren Kolben und Zylinder möglichst verschiedene Abmessungen haben, kann bei Übereinstimmung der auf Angaben die richtige Erfassung der Korrekturen durch die Formeln geschlossen werden [8].

b₂) Mittelbare Vergleichs- (Differential-) Verfahren.

α) Es werden 2 Kolbenmanometer unter Zwischenschalten eines Hg-Manometers als Differentialmanometer miteinander verglichen [7] (Abb. 13). Hat letzteres einen Meßbereich von 25 at, so würde der Gang der Vergleichung etwa so verlaufen können:

Hg-Manometer wird mit jedem der beiden Kolbenmanometer, wie unter b₁ α) angedeutet, verglichen.

Als dann wird eins der Kolbenmanometer mit einem Druck vom doppelten Betrag des Enddruckes (im angenommenen Fall 25 at) belastet. Außerdem wird der Druck mit dem hintereinander geschalteten Hg- und anderem Kolbenmanometer verglichen. Damit wäre ein Druck doppelt so hoch wie der Ausgangsdruck (im Beispiel 2 · 25 at) erreicht. Nunmehr vergleicht man die beiden Kolbenmanometer bei diesem höheren Druck, wie unter b₁ β) beschrieben, untereinander. So lassen sich in Stufen des Enddruckes beim Hg-Manometer 2 Kolbenmanometer

Eine konventionelle Druckskaie bis 20 000 at

V

1340-1

Verfasser: Dr. H. Ebert, Braunschweig

DK 531.787

Einleitung

Außer der Festlegung eines physikalischen Begriffes und seiner Einheit müssen Verfahren zur Messung der physikalischen Größe festgesetzt werden. Neben den einfachen, üblichsten Verfahren sind solche zur fundamentalen Bestimmung bzw. zum fundamentalen Anschluß notwendig.

Es ist allgemein kaum bekannt, welche entsagungsvolle gewissenhafte Arbeit dazu gehört, solche Fundamentalverfahren zu entwickeln und durchzuführen. Diese bleibt in den weitaus meisten Fällen den zu diesem Zweck ins Leben gerufenen entsprechenden Staatsinstituten vorbehalten.

Ein besonders bezeichnendes Beispiel ist die Fundamentalbestimmung der Temperatur, die mit einem Gas-thermometer und wohl nur an wenigen Stellen physikalischer Forschung durchgeführt wird. Um einem größeren Kreis ebenfalls die Möglichkeit eines praktisch fundamentalen Anschlusses zu geben, ist eine Temperaturskala aufgestellt worden, die mit erheblich einfacheren experimentellen Mitteln unter Heranziehung der zuvor gewonnenen Erfahrungen andere Geräte anzuschließen gestattet. Aber auch diese Verfahren werden nur einem kleinen experimentierenden Kreis vorbehalten bleiben, während man allgemein amtlich geprüfte oder geeichte Thermometer verwendet, wodurch die Gewähr gegeben ist, die Temperatur richtig messen zu können.

Ähnlich liegen die Dinge bei einer anderen Zustandsgröße, dem Druck. Hier steht man aber erst am Anfang einer der Temperaturmessung analogen Entwicklung. Wenn auch die Forschung bereits in Druckbereiche bis zu 100 000 at vorgedrungen ist¹, so sind doch bezüglich der Druckmessung noch keine international anerkannten Meßverfahren eingeführt worden. Es ist in dieser Richtung eigentlich erst ein einziger Schritt getan, indem man gelegentlich der internationalen Beschlüsse über eine internationale Temperaturskala (9. Generalkonferenz für Maß und Gewicht, Sitzung am 19. Oktober 1948²) den Druck einer physikalischen Normalatmosphäre zu 1013250 dyn-cm² festlegte und weiter bestimmte, daß dieser Druck durch eine Quecksilbersäule von 760 mm Höhe bei einer Dichte des Quecksilbers von 13,5951 g/cm³ und einer Fallbeschleunigung von 980,665 cm s⁻² dargestellt wird, ferner daß der 760. Teil dieser physikalischen Normalatmosphäre 1 Torr heißen soll. Die Begriffe Druck, Unter- und Überdruck sowie Vakuum sind in DIN 1314 festgelegt.

1. Die fundamentalen Druckmeßverfahren

Es gilt nun, auf diese internationale Normalatmosphäre Drucke anderer Bereiche zu beziehen. Das ge-

schieht unter Bezug auf die Quecksilbersäule mittels Flüssigkeits-, im wesentlichen Quecksilbermanometer³ auf Grund des Prinzips der kommunizierenden Röhren (Bild 1). Bei diesen Geräten müssen die üblichen Berichtigungen (richtiger Maßstab, richtige Flüssigkeitsdichte, Norm-Fallbeschleunigung, Kapillardepresion) angebracht werden⁴.

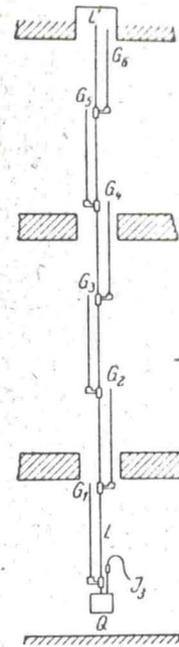


Bild 1. Schema eines mehrstöckigen Quecksilbermanometers; L' L langer Schenkel aus Stahl; G₁ bis G₅ Glasrohre, durch besonderen Hahn abstellbar, 2 m lang, mit L' L kommunizierend; Z, Ende des kurzen Schenkels; Q Quecksilbervorratsgefäß; - (aus *Hub. Phys.* 2 (1926), S. 353).

Da aber diese Flüssigkeitsmanometer infolge großer apparativer Schwierigkeiten kaum über einige hundert Atmosphären verwendbar sind, werden andere Verfahren — sekundär fundamentale — benutzt, um Drucke, meist oberhalb 25 at, zu messen. Es handelt sich dabei um sog. Kolbenmanometer, bei denen (Bild 2) eine Fläche, dargestellt durch die Stirnfläche eines zylindrischen Kolbens K, der in einem Zylinder Z mit passender Bohrung sitzt, durch Gewichte mittels des Gehänges G belastet wird⁵. Diese Geräte werden durch besondere Verfahren an das Flüssigkeitsmanometer angeschlossen. Dabei werden in niedrigerem Druckbereich (bis etwa 200 at) zwei Kolbenmanometer unter Zwischenschalten eines Quecksilbermanometers als Differentialmanometer gegeneinander abgeglichen (Bild 3)⁶. Bei den Kolbenmanometern muß — und darum ist ein Fundamentalschluß an die Flüssigkeitsmanometer notwendig —

der Einfluß des Druckes auf Kolben und Zylinder berücksichtigt werden (s. Tafel 1 u. 2). Die anderen Berichtigungen, wie Fehler, Luftauftrieb der Gewichtsstücke, bezug auf Norm-Fallbeschleunigung, gegebenenfalls richtiges Übersetzungsverhältnis des Druckwaagenbalkens, müssen zuvor angebracht sein. In höheren Druckbereichen (bis etwa 5000 at) bedient man sich als vergleichendes Zwischenglied eines Differenzkolbenmanometers⁷. Durch solche Vergleichenungen kann die

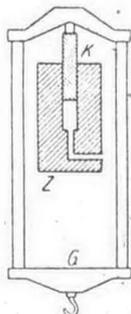


Bild 2. Schema eines Kolbenmanometers; K Kolben; Z Zylinder; G Gehänge; (ebenda S. 360).

theoretisch errechnete elastische Deformation⁸ experimentell gestützt werden. Oberhalb 5000 at wird z. Z. das Druckmeßverfahren dadurch gesichert, daß neben dem Kolbenmanometerprinzip ein weiteres herangezogen wird. Dieses beruht darauf, daß sich der elektrische Widerstand der Stoffe unter Druck ändert⁹. Für die Zwecke der Druckmessung muß ein Stoff ausgesucht werden, der besondere Bedingungen erfüllt, vor allem kleiner Temperatur- und großer Druckkoeffizient ($< 10^{-5}$ je Grad und $> 10^{-6}$ je at), dazu Reproduzierbar-

Druckabhängigkeit weiter vorausgesetzt. Die so extrapolierten Angaben beider Manometergattungen müßten in Koordinatensystemen und in gleichen Einheiten (z. B. at) aufgetragen, eine gerade Linie mit 45° Steigung er-

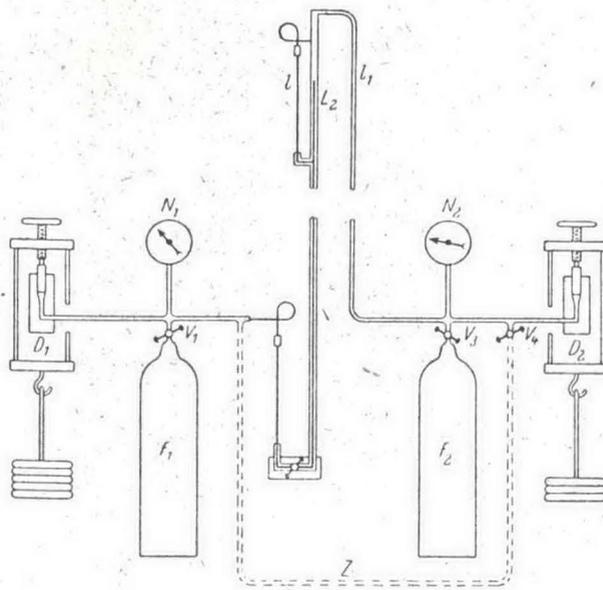


Bild 3. Anordnung zur Vergleichung zweier Kolbenmanometer; D₁, D₂ die beiden Kolbenmanometer; L₁, L₂ das Quecksilbermanometer als Differentialmanometer; V₁ bis V₄ Ventile; F₁, F₂ Druckluftflaschen; N₁, N₂ Kontroll-Manometer; l Parallel-Ableserrohr; l₁ Verbindungsleitung; Z Ausgleichleitung; (ebenda S. 362).

geben. Es ist experimentell erwiesen, daß das bis 10000 at auf 0,5%, bis 12000 at auf 1% der Fall ist¹¹, wobei die größere Unsicherheit im wesentlichen durch die erhöhte Zähigkeit der Übertragungsflüssigkeit bedingt sein wird. Um auch oberhalb 12000 at eine Druck-

Tafel 1. Berichtigungen für Flüssigkeitsmanometer

	Temperatur		bezogen auf Normalfallbeschleunigung $g_0 = 980,665 \text{ cm s}^{-2}$	Druckabhängigkeit der Kompressibilität
	Flüssigkeit	Maßstab		
Ablesung h , wenn notwendig, bezüglich Kapillarität der Flüssigkeit (Depression bei Hg) korrigiert	$h_0' = \frac{h}{1 + \gamma t}$	Maßstab bei t_0 richtig $h_0'' = h_0' \cdot \{1 + \beta(t - t_0)\}$ Maßstab aus Glas: $\beta = 9 \cdot 10^{-6}$ Stahl: $\beta = 12 \cdot 10^{-6}$ Messing: $\beta = 19 \cdot 10^{-6}$ je Grad	$h_0 = h_0'' \cdot \frac{g}{g_0}$	Es ist der Druck $p = \rho h_0 \left(1 + \frac{1}{2} \kappa \cdot \rho_0 h_0\right)$ ρ_0 spez. Raumgewicht κ Kompressibilität Für Hg: $\rho_0 = 13,5951 \text{ p} \cdot \text{cm}^{-3}$ $\kappa (p = 1 \text{ at}) = 38 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{kp}^{-1}$
	für Hg: $\gamma = 0,000182$ je Grad			

keit der Widerstandswerte, gegebenenfalls nach vorheriger Alterung unter Druck und Temperatur. Als geeignet haben sich Legierungen, vor allem mit Mangan, erwiesen¹⁰. Am gebäuchlichsten ist z. Z. emaillierter Manganindraht, der bifilar zu einer kleinen Spule aufgewickelt und dann an einem Spulenhalter (Bild 4) befestigt wird. Bis 5000 at wird ein solches Widerstandsmanometer mit einem Kolbenmanometer verglichen. Dabei ergibt sich eine lineare Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Manganin mit dem Druck, und zwar mit positivem Koeffizienten im Gegensatz zum negativen bei reinen Metallen. Oberhalb 5000 at werden die für das Kolbenmanometer unterhalb 5000 at gefundenen Berichtigungen mit der gleichen Formel extrapoliert und für das Widerstandsmanometer die lineare

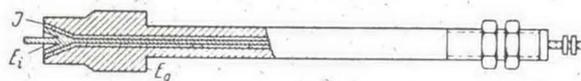


Bild 4. Halter der Spule eines Widerstandsmanometers; E_a äußere Elektrode; E_i innere Elektrode; J Isolation; (aus H. Ebeft, Z. angew. Phys. 1 (1949), S. 338, Abb. 14).

messung zu ermöglichen, ist in Anlehnung an Amagat¹² das hydraulische Prinzip angewendet worden¹¹, indem der mit einem Widerstandsmanometer gemessene Druck hydraulisch untersetzt wird, hydraulische Kolbenmanometer mit einem Kolben, dessen Teil mit kleinem Querschnitt an der Hochdruckseite, dessen Teil mit größerem Querschnitt an der Niederdruckseite angeschlossen ist. Bei Kenntnis des Untersetzungs- und der Reibungs-

Tafel 2. Berichtigungen für Kolbenmanometer

Kolbenart	Schema	elastische Deformation bei		resultierende elastische Berichtigung an der sonst bereits korrigierten Druckangabe p
		Kolben	Zylinder	
Amagatkolben (ungedichtet)		$\epsilon_{k_1} = -(1 - \mu) \cdot \frac{p}{E}$ (Quetschen; kein allseitiger Druck) und ϵ_{k_2} (Einfluß der Gewichte) = $- \mu \frac{p}{E}$ (ziehend) $+ \mu \frac{p}{E}$ (stauchend)	$\epsilon_z = \frac{(1 + \mu) r_o^2 - (1 - \mu) r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \cdot \frac{p}{E}$ $= k \cdot \frac{p}{E}$	$k_u = \begin{cases} -(k-1) \cdot \frac{p^2}{E} \\ -(k-1+2\mu) \frac{p^2}{E} \end{cases}$
Stückrathkolben (manschetten-gedichtet)		$\epsilon_k = - \mu \frac{p}{E}$	$\epsilon_z = k \cdot \frac{p}{E}$	$k_m = - 2 k \cdot \frac{p^2}{E}$
Bridgmankolben (nutgedichtet)		(Gewichte stauchend) am offenen Ende der Nut: $\epsilon_k = - (1 - 2\mu) \cdot \frac{p}{E}$ (Kompression) Daraus Querschnittsänderung $(I) - 2 (1 - 2\mu) \cdot \frac{p}{E}$ am geschlossenen Ende der Nut: $r = r_o \left(1 + \mu \frac{p}{E} \right)$	$R = R_o \cdot \left(1 - \frac{a}{E} \cdot p \right)$ $r_o \left(1 + \mu \frac{p_{s_0}}{E} \right) = (r_o + s_0) \left(1 - \frac{a}{E} p_{s_0} \right)$ $a = \frac{E s_0 - p_{s_0} r_o \mu}{p_{s_0} \cdot (r_o + s_0)}$	$k_n = - \frac{1}{2} (5\mu - a - 2) \cdot \frac{p^2}{E}$
		effektiver Radius: $r_e = \frac{r + R}{2} = \frac{r_o + R_o}{2} \left(1 + \frac{\mu - a}{2} \cdot \frac{p}{E} \right)$ daraus Querschnittsänderung: $(II) (\mu - a) \cdot \frac{p}{E}$ wirksamer Querschnitt: Mittel aus (I) und (II), so daß		

hältnisse — bis 12000 at auf Grund der festgelegten und experimentell erprobten Erkenntnisse bekannt — können wiederum durch Extrapolation dieser Berichtigungen aus den entsprechend korrigierten Angaben des Widerstandsmanometers Drucke oberhalb 12000 at gemessen werden. Während sich die Reibungseinflüsse des hydraulischen Kolbens bei der verwendeten Apparatur (Basset-Presse, Gummidichtung) als vom Druck quadratisch ergeben, zeigt sich für den elektrischen Widerstand des Manganins innerhalb 2% eine lineare Abhängigkeit vom Druck, so daß — bis 20000 at erprobt — der Druck mit einem nach diesen Richtlinien angeschlossenen Widerstandsmanometer gemessen werden kann.

2. Die konventionelle Druckskale

Nach dem augenblicklichen Stand der Dinge gelten als Fundamentalgeräte das

Quecksilbermanometer bis 25 at,
 Kolbenmanometer bis 5000 at,
 Widerstands- und Kolbenmanometer bis 12000 at,

Widerstands- und Hydraulisches Manometer oberhalb 12000 at,
 zunächst erprobt bis 20000 at.

Für einen Fundamentalanschluß eines sekundären Druckmessers kann auch der Weg über Druckfixpunkte beschrieben werden, die mittels Fundamentalverfahren bestimmt worden sind. Insbesondere können bei einem Widerstandsmanometer die elektrischen Widerstände R_0 und R_f bei einem Überdruck Null sowie bei einem der Fixpunkte (p_f) gemessen und der Koeffizient daraus berechnet werden:

$$\alpha = \frac{R_f - R_0}{R_0 \cdot p_f}$$

3. Die Fixpunkte

Als solche werden empfohlen (Bridgman⁸):
 Erstarrungspunkte von Quecksilber

	7640 at bei 0° C
	13715 at bei 30° C
Übergang Wismuth I \rightleftharpoons II	25420 at bei 30° C
	23350 at bei 75° C

Schrifttum

1. P. W. Bridgman, Proc. Am. Acad. **74**, (1942), S. 425; **76**, (1945/48), S. 1 u. 55. — J. Basset, J. phys. Radium (7) **10** (1939), S. 9 u. 91; **14** (1943), S. 62. — 2. C. R. des Séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures, Paris 1949, S. 93. — 3. L. Holborn u. F. Henning, Ann. Phys. (4) **26** (1908), S. 834. — 4. H. Ebert, Hdb. Phys. Bd. 2, Bln. 1926; — W. Wuest, ATM-Blatt V 1343—1 (März 1943). — 5. Buchholz, Dinglers J. **247** (1883), S. 21. — 6. L. Holborn u. H. Schultze, Ann. Phys. (4) **47** (1915), S. 1089. — 7. H. Ebert, Phys. Z. **36** (1935), S. 385. — 8. W. Meißner, Z. Instrkde. **30** (1910), S. 137; P. W. Bridgman, Physics of high pressures, London 1931; Rev. mod. Phys. **18** (1946), S. 1. — 9. E. Lisell, Ofv. of Konigl. Vetensk. Akad. Förh. **55** (1898), S. 697. — 10. H. Ebert u. J. Gieleßen, Ann. Phys. (6) **1** (1947), S. 229. — 11. H. Ebert, Z. f. angew. Phys. **1** (1949), S. 331; die Arbeit enthält in den Formeln 13 bis 15 Druckfehler; den Herren Dr. J. Gieleßen und Dipl.-Ing. M. Schuster bin ich für Kritik und Hinweise zu Dank verpflichtet. — 12. E. H. Amagat, Ann. chim. phys. **29** (1893), S. 70.