

# **PTB-Prüfregeln**

## **Flüssigkeitsmanometer**

**Physikalisch-Technische Bundesanstalt**

Braunschweig und Berlin

ISSN 0341-7964

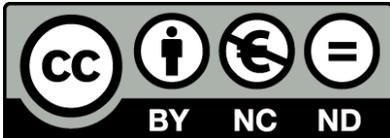
389,1

PTB - Prüfregeln

15

Diese elektronische Version der PTB-Prüfregel Band 15 ist durch Digitalisierung der 1980 erschienenen Druckversion erzeugt worden. Die folgenden Seiten sind Bilddateien.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt und unterliegt der Creative Commons Nutzerlizenz CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



**Empfohlene Zitierweise:**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Flüssigkeitsmanometer [online]. Bearbeitet von Johannes Gieleßen, Jochen Jäger und Günter Schoppa. Braunschweig, © 1980, digitalisiert 2020. PTB-Prüfregeln, Band 15. ISSN 0341-7964.

Verfügbar unter: <https://doi.org/10.7795/510.202007161>

**Herausgeber:**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

ISNI: 0000 0001 2186 1887

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Telefon:(05 31) 592-93 13

Telefax:(05 31) 592-92 92

[www.ptb.de](http://www.ptb.de)

PTB - PRÜFREGELN

FLÜSSIGKEITSMANOMETER

Bearbeitet von Dr. Johannes Gieleßen†, Dr. Jochen Jäger und  
Günter Schoppa

Herausgegeben von der  
Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)  
in Zusammenarbeit mit den Eichaufsichtsbehörden

RARA-MAGAZIN

BIBLIOTHEK  
Phys. Techn.  
Bundesanstalt

**PTB-Bibliothek BS**



**\*1981.0480\***

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT  
Braunschweig und Berlin ISSN 0341-7964

Die PTB-Prüfregeln sollen als Unterlage und Richtlinie für die Prüfung von Meßgeräten und Betriebsmitteln dienen. Den wesentlichen Teil einer Prüfregel bildet demnach die ausführliche Beschreibung der Prüfverfahren, der benötigten Normalgeräte und anderer Prüfmittel. Soweit es zum besseren Verständnis nützlich erscheint, wird auch auf die Ausführung der Gerätearten und auf Besonderheiten, die bei ihrer Anwendung zu beachten sind, eingegangen. Das Gebiet der PTB-Prüfregeln umfaßt nicht nur die eich- und beglaubigungsfähigen Meßgeräte, sondern auch Meßgeräte und Objekte anderer Art, die im Bereich der PTB geprüft werden. Die Prüfregeln wenden sich sowohl an die Eichbehörden, staatlich anerkannten Prüfstellen und Überwachungsorgane als auch an die Prüflaboratorien von Industrie und Wirtschaft. Sie werden ferner für die Einrichtung von Prüfstellen und Meßräumen sowie für Lehrzwecke von Nutzen sein.

Schriftleitung: Dr. W. Hauser,  
Bundesallee 100, 3300 Braunschweig

PTB-Prüfregeln Band 15

Alle Rechte vorbehalten  
Copyright © 1980 by Physikalisch-Technische Bundes-  
anstalt Braunschweig  
Satz und Druck: Schreibmaschinenmanuskript/Bildstelle  
der PTB  
Umschlag und buchbinderische Verarbeitung:  
Waisenhaus-Buchdruckerei Braunschweig  
Printed in Germany

INHALTSVERZEICHNIS

1	Vorbemerkung	1
2	Druckberechnung für ein gleichschenkliges U-Rohr-Manometer	2
3	Druckberechnung für ein Gefäßmanometer	4
4	Bauarten von Flüssigkeitsmanometern	6
5	Anwendung und Prüfung von Flüssigkeitsmanometern	9
5.1	Allgemeine Prüfbedingungen	9
5.2	Das U-Rohr-Manometer	11
5.2.1	Sperrflüssigkeit Quecksilber; Messung des absoluten Drucks	11
5.2.2	Sperrflüssigkeit Quecksilber; Messung des Überdrucks	13
5.2.3	Sperrflüssigkeit Quecksilber; Messung der Druckdifferenz	15
5.2.4	Sperrflüssigkeit Wasser; Messung des Überdrucks	17
5.2.5	Sperrflüssigkeit Wasser; Messung der Druckdifferenz	19
5.3	Das Gefäßmanometer	20
5.3.1	Sperrflüssigkeit Quecksilber; Messung des absoluten Drucks	20
5.3.2	Sperrflüssigkeit Quecksilber; Messung des Überdrucks	22
5.3.3	Sperrflüssigkeit Quecksilber; Messung der Druckdifferenz	23
5.3.4	Sperrflüssigkeit Wasser; Messung des Überdrucks	24
5.3.5	Sperrflüssigkeit Wasser; Messung der Druckdifferenz	25
5.4	Das Schwimmermanometer	26
5.5	Das Flüssigkeits-Mikromanometer	28
5.6	Das Tauchlocken-Manometer	29
6	Bauarten der Barometer	30
7	Anwendung und Prüfung von Barometern	32
7.1	Allgemeine Prüfbedingungen	32
7.2	Druckmessungen mit Barometern	34
8	Anhang	
8.1	Druck - Definitionen und Einheiten	38
8.2	Beispiele	40
8.2.1	Vergleich eines Stationsbarometers mit einem Gefäßheberbarometer	41
8.2.2	Vergleich eines Gefäßmanometers mit einem gleichschenkligen U-Rohr	43
8.2.3	Vergleich eines Wasserminimeters mit einem Schwimmermanometer	45
8.2.4	Vergleich eines Schrägrohrmanometers mit einem Schwimmermanometer	49
8.2.5	Vergleich eines Schwimmermanometers mit einem gleichschenkligen U-Rohr-Manometer unter statischem Druck	51
8.2.6	Prüfungsschein - Beispiel	53
9	Tabellen und Abbildungen	57

<https://doi.org/10.7795/510.20200716I>

## 1 VORBEMERKUNG

Bei Flüssigkeitsmanometern unterscheidet man zwei Typen von Druckmeßgeräten. Der eine Typ besteht aus einem gleichschenkligen U-Rohr. Bei dem anderen Typ, dem Gefäßmanometer, ist ein Schenkel des U-Rohres zu einem Gefäß erweitert. Als manometrische Sperrflüssigkeiten werden vor allem Quecksilber und Wasser verwendet. Mit einer Quecksilbersäule können Druckdifferenzen, Überdrücke und Absolutdrücke bestimmt werden, während mit einer Wassersäule nur Druckdifferenzen und Überdrücke gemessen werden können. Absolutdrücke können mit einer Wassersäule nicht bestimmt werden, weil der Dampfdruck des Wassers bei 20 °C schon etwa 23 mbar beträgt.

Die Messungen mit einem Druckmeßgerät beziehen sich immer auf eine bestimmte Druckbezugsebene. Ein Vergleich zwischen zwei Druckmeßgeräten (z.B. Prüfling und Normal) ist nur möglich, wenn beide Geräte auf die gleiche Druckbezugsebene bezogen werden.

## 2 DRUCKBERECHNUNG FÜR EIN GLEICHSCHENKLIGES U-ROHR-MANOMETER

Die Druckbezugsebene A-B des gleichschenkligen U-Rohres (Abb. 1) ist diejenige Ebene, in der für  $\Delta p = 0$  beide Menisken liegen. Wird mit einem gleichschenkligen U-Rohr als Normal die Druckdifferenz  $\Delta p = p_1 - p_2$  in der Druckbezugsebene A' - B' des Prüflings gemessen, so ergeben sich mit den Bezeichnungen der Abb. 1 folgende Gleichungen:

$$\begin{aligned} p_{10} &= p'_1 - g a \rho_G(p_{10}, t) & p'_2 &= p_{20} - g b \rho_G(p_{20}, t) \\ p'_1 &= g h \rho_F(p_m, t) + p'_2 & p_1 &= p_{10} + g c \rho_G(p_{10}, t) \\ p_m &= \frac{1}{2}(p'_1 + p'_2) & p_2 &= p_{20} + g c \rho_G(p_{20}, t) \end{aligned}$$

Dabei ist die Abhängigkeit der Gasdichten  $\rho_G$  von der Höhe vernachlässigt. Für die Flüssigkeitsdichte  $\rho_F(p, t)$  wird ein Mittelwert  $\rho_F(p_m, t)$  eingesetzt. Beim gleichschenkligen U-Rohr ist  $a = b = \frac{h}{2}$ . Die Bezeichnungen a und b werden aber mit Rücksicht auf den Übergang zum ungleichschenkligen U-Rohr oder Gefäßmanometer beibehalten. Die Auflösung dieses Gleichungssystems führt auf folgendes Ergebnis:

$$(2-1) \quad p_1 - p_2 = g h \rho_F(p_m, t) - g c \rho_G(p_{20}, t) - g b \rho_G(p_{20}, t) - g a \rho_G(p_{10}, t) + g c \rho_G(p_{10}, t)$$

Mit  $a = b = \frac{1}{2}h$ ,  $\rho_G(\rho_{10}, t) \approx \rho_G(\rho_1, t)$  und  $\rho_G(\rho_{20}, t) \approx \rho_G(\rho_2, t)$

erhält man daraus

$$(2-2) \quad \Delta p = p_1 - p_2 = gh[\rho_F(\rho_m, t) - \rho_G(\rho_2, t)] + g(\pm c - \frac{1}{2}h)[\rho_G(\rho_1, t) - \rho_G(\rho_2, t)].$$

Darin sind  $g$  die Fallbeschleunigung,  $h$  und  $c$  die in Abb. 1 angegebenen Höhen,  $\rho_G(\rho_1, t)$  und  $\rho_G(\rho_2, t)$  die Gasdichten bei der Temperatur  $t$  und den absoluten Drücken  $p_1$  und  $p_2$  und  $\rho_F(\rho_m, t)$  die Flüssigkeitsdichte bei der Temperatur  $t$  und dem mittleren Druck  $p_m = \frac{1}{2}(p_1 + p_2) \approx \frac{1}{2}(p_1 + p_2)$ , der für  $\Delta p \ll p_1, p_2$  mit hinreichender Genauigkeit durch den statischen Druck bei  $\Delta p = 0$  ersetzt werden kann. Das Vorzeichen  $+$  vor dem Abstand  $c$  der beiden Druckbezugsebenen voneinander gilt für den Fall, daß die Druckbezugsebene des Prüflings unter derjenigen des Normals liegt. Das negative Vorzeichen gilt für den Fall, daß die Druckbezugsebene des Prüflings über derjenigen des Normals liegt.

Die Dichte der Flüssigkeit unter dem absoluten Druck  $p$  bei der Temperatur  $t$  wird nach der Gleichung

$$(2-3) \quad \rho_F(\rho_m, t) = \rho_F(\rho_0, t)[1 + \chi(\rho_m - \rho_0)] \approx \rho_F(\rho_0, t)[1 + \chi(\rho_e)_m]; \quad (\rho_e)_m = \rho_m - \rho_{amb}$$

berechnet. Darin sind  $\rho_F(\rho_0, t)$  die Dichte der Flüssigkeit unter dem absoluten Druck  $p_0 = 1,01325$  bar bei der Temperatur  $t$  und  $\chi = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dp}$  die Kompressibilität der Flüssigkeit. Für die Kompressibilitäten gelten bei Raumtemperatur folgende Zahlenwerte:

$$\chi_{Hg} = 4,04 \cdot 10^{-6} \text{ bar}^{-1}; \quad \chi_{H_2O} = 47 \cdot 10^{-6} \text{ bar}^{-1} \quad \left( \begin{array}{l} 1 \text{ bis} \\ 50 \text{ bar} \end{array} \right)$$

Die Dichten  $\rho_F(\rho_0, t)$  von Quecksilber und Wasser unter dem absoluten Druck von 1,01325 bar in Abhängigkeit von der Temperatur im Bereich 0 °C bis 40 °C sind in den Tabellen 2 und 3 enthalten. Die Dichte des Quecksilbers kann auch mit genügender Genauigkeit in einem nicht zu großen Temperaturbereich berechnet werden gemäß

$$(2-4) \quad \rho_{Hg}(t) = \rho_{Hg}(\rho_0, 0^\circ\text{C})(1 - \gamma t)$$

mit dem Volumenausdehnungskoeffizienten  $\gamma$ . Es ist  $\rho_{Hg}(\rho_0, 0^\circ\text{C}) = 13,5951 \text{ g/cm}^3$  und  $\gamma = 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Die Temperaturabhängigkeit von  $\chi_{Hg}$  und  $\chi_{H_2O}$  kann bei Messungen in der Umgebung der Raumtemperatur vernachlässigt werden.

Die Dichten der Gase Luft und Stickstoff im Bereich 0 °C bis 40 °C

und bei absoluten Drücken von 1 bar bis 150 bar sind in den Tabellen 4a und 5 angegeben. Ist  $\rho_G(p_{\text{Tab}}, t_{\text{Tab}})$  die in der Tabelle angegebene Dichte, so erhält man die Zwischenwerte für die Gasdichte  $\rho_G(p, t)$  nach der Gleichung

$$(2-5) \quad \rho_G(p, t) = \rho_G(p_{\text{Tab}}, t_{\text{Tab}}) \rho T_{\text{Tab}} (p_{\text{Tab}} T)^{-1}$$

wobei die Temperatur T durch  $T = t + 273,15$  gegeben ist (T in K, t in °C).

Die Druckdifferenz nach Gleichung (2-2) ergibt sich in Pascal mit den Höhen h und c in mm, den Dichten  $\rho_F$  und  $\rho_G$  in  $\text{g/cm}^3$  und der Fallbeschleunigung g in  $\text{m/s}^2$ .

Die Gleichung für die Berechnung des Überdruckes erhält man aus der allgemeingültigen Gleichung (2-2) zur Berechnung der Druckdifferenz, wenn  $p_2 = p_{\text{amb}}$  und  $p_1 - p_{\text{amb}} = p_e$  gesetzt wird:

$$(2-6) \quad p_e = p_1 - p_{\text{amb}} = g h [\rho_F(p_m, t) - \rho_G(p_{\text{amb}}, t)] + g (\pm c - \frac{1}{2} h) [\rho_G(p_1, t) - \rho_G(p_{\text{amb}}, t)].$$

Die Gleichung gilt für die Druckbezugsebene des Prüflings (Vorzeichen von c wie in Gleichung (2-2)).

Die Gleichung für die Berechnung des absoluten Drucks in der Druckbezugsebene des Prüflings ergibt sich aus Gleichung (2-2), wenn  $p_2 = 0$  gesetzt wird:

$$(2-7) \quad p = g h \rho_F(p_m, t) + g (\pm c - \frac{1}{2} h) \rho_G(p, t)$$

(Vorzeichen von c wie in Gleichung (2-2)).

Die Gleichungen (2-6) und (2-7) zeigen, daß Überdruckmessung und Absolutdruckmessung als Spezialfälle der Druckdifferenzmessung mit  $p_2 = p_{\text{amb}}$  oder  $p_2 = 0$  aufgefaßt werden können.

### 3 DRUCKBERECHNUNG FÜR EIN GEFÄßSMANOMETER

Für die Berechnung der mit einem Gefäßmanometer (Abb. 2) gemessenen Druckdifferenz und damit auch des Überdrucks und des Absolutdrucks gilt die allgemeine Gleichung (2-2). Das Absinken des Meniskus im weiten Niveaugefäß infolge des Anstiegs der Flüssigkeit im Steigrohr ist durch  $a = h d^2 / (D^2 + d^2)$  gegeben, wobei D bzw. d die Durchmesser des Gefäßes bzw. des Steigrohres sind. Daraus ergibt sich  $b = h [1 - d^2 / (D^2 + d^2)]$ .

Wegen  $d^2 \ll D^2$  ist  $a \ll b$  und  $b \approx h$ . Damit läßt sich Gleichung (2-1) für das Gefäßmanometer näherungsweise in folgender Form schreiben:

$$(2-8) \quad \Delta p = p_1 - p_2 = gh [\rho_F(\rho_m, t) - \rho_G(\rho_2, t)] \pm gc [\rho_G(\rho_1, t) - \rho_G(\rho_2, t)]$$

Dabei gilt das Vorzeichen + bei dem Abstand c der Druckbezugsebene für den Fall, daß die Druckbezugsebene des Prüflings wie gezeichnet unter derjenigen des Normals liegt.

Auch hier erhält man die Gleichung für die Messung von Überdrücken bzw. Absolutdrücken durch Einführen von  $p_2 = p_{amb}$  mit  $p_e = p_1 - p_{amb}$  bzw. von  $p_2 = 0$  in Gleichung (2-8):

$$(2-9) \quad p_e = p_1 - p_{amb} = gh [\rho_F(\rho_m, t) - \rho_G(\rho_{amb}, t)] \pm gc [\rho_G(\rho_1, t) - \rho_G(\rho_{amb}, t)]$$

$$(2-10) \quad p = gh \rho_F(\frac{1}{2} \rho, t) \pm gc \rho_G(\rho, t)$$

Bei der Messung von Absolutdrücken in der Größenordnung des atmosphärischen Druckes mit Quecksilber als Sperrflüssigkeit ist es zweckmäßig, Gleichung (2-10) in einer speziellen Form zu verwenden. In diesem Fall kann  $\rho_{Hg}(\frac{D}{2}, t)$  mit guter Näherung durch  $\rho_{Hg}(p_0, t)$  ersetzt werden (d.h. die Druckabhängigkeit der Quecksilberdichte wird vernachlässigt). In der Druckbezugsebene des Normals (d.h. für  $c = 0$ ) gilt dann mit Gleichung (2-4):

$$(2-11) \quad p = gh \rho_{Hg}(\rho_0, 0^\circ C) (1 - \gamma t)$$

Unter Berücksichtigung der Temperaturkorrektur für den zur Längenmessung verwendeten Maßstab gilt für den Abstand  $h$  der beiden Menisken die Beziehung

$$(2-12) \quad h = l_a [1 + \alpha(t_M - t_B)]$$

wenn der Abstand mit einem Maßstab mit der Temperatur  $t_M$ , der Bezugstemperatur  $t_B$  und dem Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  gemessen wird. Es ist  $l_a$  die abgelesene Länge der Säule, d.h. die Differenz der abgelesenen Höhen der Menisken. Für die gebräuchlichen Maßstabmaterialien haben die Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  bei Raumtemperatur folgende Werte:

$$\alpha_{MS} = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \quad \alpha_{St} = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \quad \alpha_{Gl} = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

Die Temperatur  $t_M$  des Maßstabes wird im allgemeinen gleich der Temperatur des Quecksilbers und gleich der Umgebungstemperatur sein. Führt man Gleichung (2-12) in Gleichung (2-11) ein, so ergibt sich mit  $t_M = t$  der Druck  $p$  in Pa zu

$$(2-13) \quad \begin{aligned} p &= g l_a [1 + \alpha(t - t_B)] \rho_{Hg}(\rho_0, 0^\circ\text{C})(1 - \gamma t) \\ &= g \rho_{Hg}(\rho_0, 0^\circ\text{C}) l_a \left[ 1 - \frac{\gamma t - \alpha(t - t_B)}{1 + \gamma t} \right] \\ &= g \rho_{Hg}(\rho_0, 0^\circ\text{C}) l_a u_{t_B}(t) \end{aligned}$$

mit  $g$  in  $\text{m/s}^2$ ,  $l_a$  in  $\text{mm}$  und  $\rho_{Hg}$  in  $\text{g/cm}^3$ . Die Werte des Temperaturkorrektionsfaktors  $u_{t_B}(t)$  können der Tabelle 6 entnommen werden.

Man erhält den Druck in Torr mit einem in Torr oder in  $\text{mm}$  geteilten Maßstab oder in  $\text{mbar}$  mit einem in  $\text{mbar}$  geteilten Maßstab nach der Beziehung

$$(2-14) \quad p = \frac{g}{g_n} l_a u_{t_B}(t)$$

Dabei ist  $g_n$  die Normalfallbeschleunigung.

Man erhält den Druck in  $\text{mbar}$  unter Verwendung eines in  $\text{mm}$  geteilten Maßstabes, indem man Gleichung (2-14) mit dem aus Tabelle 1 hervorgehenden Umrechnungsfaktor zwischen Torr und  $\text{mbar}$  multipliziert.

Dieselbe Gleichung gilt auch für das gleichschenklige U-Rohr-Manometer, wenn die Ebene des Quecksilbermeniskus in dem unter Druck stehenden Schenkel des U-Rohres als Druckbezugsebene gewählt wird. Für diese Ebene ist  $c \approx \frac{1}{2} a$  (vgl. Abb. 1).

#### 4 BAUARTEN VON FLÜSSIGKEITSMANOMETERN

Folgende Bauarten werden im allgemeinen verwendet:

1. gleichschenkliges U-Rohr
2. Gefäßmanometer mit einem Steigrohr und einem weiten Niveaugefäß
3. Schwimmermanometer in der Form des gleich- oder ungleichschenkligen U-Rohres
4. Mikromanometer
5. Tauchglocke für kleine positive und negative Überdrücke

Sperrflüssigkeiten sind je nach Anwendungsart und Meßbereich der Manometer Quecksilber und Wasser, seltener Öle, Alkohole und Kohlenwasserstoffe mit niedriger Oberflächenspannung. Stets muß gewährleistet sein, daß sich das verwendete gasförmige Druckübertragungsmedium nur in verschwindend geringem Maße in der jeweiligen Manometerflüssigkeit löst.

Hauptunterscheidungsmerkmale der unter 1. bis 4. aufgeführten Geräte ist die Art, wie die Lagen der Menisken auf einen Maßstab übertragen werden, d.h. wie die Höhendifferenz der Menisken bestimmt wird. Die Lage des höchsten Kuppenpunktes des Meniskus bei Quecksilber oder die des niedrigsten bei den übrigen Sperrflüssigkeiten kann direkt oder mit Hilfe eines auf der Flüssigkeit schwimmenden Körpers beobachtet werden. Weiterhin sind die Manometerbauarten durch die Differenz des Druckes im Gerät zum Umgebungsdruck bestimmt. Für  $p_e \leq 4$  bar ist die Verwendung von Glasrohren möglich. Für höhere Drücke sind druckfeste Fensteranordnungen zur direkten Beobachtung der Menisken vorgesehen oder, unter Verzicht auf optische Beobachtung, Metallgefäße und -rohre.

Neben der richtigen Messung des Höhenunterschiedes und der Temperatur von Sperrflüssigkeit und Maßstab unter der Voraussetzung gleichmäßiger Temperierung des Gerätes ist die Güte eines Flüssigkeitsmanometers vom Fertigungsaufwand und vom meßtechnischen Aufwand bei der Erfassung der Lage der Menisken bestimmt. Hierzu einige Beispiele, geordnet nach abnehmender Meßunsicherheit:

- a) Direkte Beobachtung mit Hilfe von Visiereinrichtungen in Form von Strichplatten oder Übersteckringen, die an den Meniskus im Glasrohr herangeführt werden. Bei der hierfür verwendeten Methode des kleinsten Lichtspaltes beträgt die kleinste erreichbare Einstellunsicherheit je nach Gerät 0,1 mm bis 0,03 mm. Die Einstellunsicherheit nimmt ab, wenn die Visiereinrichtung auf die Kante oder Strichmarke eines Schwimmkörpers eingestellt wird. Die Genauigkeit der Druckmessung ist jedoch auch bestimmt durch die nicht immer gleichmäßige Ausbildung des Meniskus am Rand des Schwimmers.
- b) Indirekte Beobachtung, bei der die Lage eines Schwimmers mittels einer je nach Sperrflüssigkeit hängenden oder stehenden, leicht geführten Skala über eine Projektionseinrichtung bestimmt wird.
- c) Indirekte Beobachtung, bei der die Lage eines Schwimmers mit Hilfe von magnetischen oder elektrischen Abtasteinrichtungen bestimmt wird. Die mit diesen Geräten erreichbare hohe Meßgenauigkeit erfordert entsprechend große Rohrdurchmesser. Die Geräte eignen sich besonders für die elektronische Verarbeitung der Meßwerte und als Regel- und Steuergeräte.
- d) Direkte Beobachtung der Menisken mit Hilfe von Nivelliergeräten oder Fernrohren mit Okularmikrometern zur direkten Übertragung der Kuppenhöhe auf einen senkrecht neben dem Gerät angeordneten Maßstab. Die Verwendung eines Schrägstreifensystems am Glasrohr erleichtert die Erfassung der Meniskuskuppe und verringert unabhängig von Beleuchtungseffekten die Meßunsicherheit bis auf 0,02 mm.
- e) Direkte Beobachtung von geeigneten Spitzen, die bei Quecksilber von oben, bei den übrigen Sperrflüssigkeiten von unten an den Meniskus herangeführt werden. Bei fester Spitze übernimmt diese Heranführung ein Flüssigkeitsverdränger. Zwar kann hierbei auch die Methode des geringsten Abstandes zwischen der Spitze und ihrem auf der Oberfläche des Meniskus sichtbaren Spiegelbild zur Lagebestimmung benutzt werden, jedoch werden bessere Ergebnisse erreicht, wenn man zwischen Spitze und Spiegelbild einen Abstand von ca. 0,05 mm bis 0,1 mm einstellt. Mit Hilfe stark vergrößernder optischer Meßmittel kann dieser Abstand sehr genau vermessen werden. Die Hälfte des gefundenen Wertes entspricht dem Abstand der Flüssigkeitsoberfläche vom Endpunkt der Spitze.
- f) Indirekte Lagebestimmung von hinreichend großen Quecksilberoberflächen (Durchmesser größer als 5 cm) durch Heranführung an Metallplatten, die zusammen mit den Quecksilberoberflächen ebene Kondensatoren bilden, zwischen denen ein kapazitiver Abgleich erfolgen kann.

Bei den unter e) und f) angeführten Geräten wird die Lage der Spitzen oder Kondensatorplatten mit geeigneten Längenmeßeinrichtungen, wie z.B. Meßspindeln, Endmaßen, Okularmikrometern oder zählenden Interferometern ermittelt. Diese Geräte sind Normalgeräte mit Unsicherheiten zwischen einigen Mikrometern und 0,01 mm.

Tauchglocken werden benutzt zur Messung kleiner positiver und negativer Überdrücke bis ca. 20 mbar. Die Sperrflüssigkeit dient nur zum Abdichten der Glocke. Ihre Dichte geht nicht in die Messung ein. Wegen der notwendigen kleinen und konstanten Oberflächenspannung wird im allgemeinen Nonan oder Decalin verwendet. Die auf die Stirnfläche der Glocke wirkende Kraft wird mit Hilfe einer gleicharmigen Waage bestimmt. Der zu messende Druck ist der Quotient aus dieser Kraft und dem wirksamen Querschnitt der Glocke.

Einige Bauarten von Flüssigkeitsmanometern verfügen über Zusatzeinrichtungen wie Dämpfungsglieder oder Flüssigkeitsfallen:

Durch Druckstöße hervorgerufene Schwingungen der Flüssigkeitssäulen werden durch Dämpfungsglieder, z.B. Kapillaren im unteren Teil des U-Rohres vermindert.

Den Druckanschlüssen vorgeschaltete Flüssigkeitsfallen oder selbsttätige Verschlusseinrichtungen sollen das Austreten der Sperrflüssigkeit in das Zuleitungssystem bei Versagen oder falscher Bedienung der Steuer- und Regeleinrichtungen verhindern.

Weitere, für einzelne Bauarten kennzeichnende Angaben enthalten die Abschnitte 5.2 bis 5.6. Hier wird vorausgesetzt, daß die Skalen der verwendeten Maßstäbe in Längeneinheiten geteilt sind. Dabei kann in die Teilung ein Reduktionsfaktor eingearbeitet sein (z.B. beim Gefäßmanometer, vgl. S. 20, oder beim Schwimmermanometer, vgl. S. 26). Die Berechnung des Drucks aus der Anzeige dieser Geräte erfolgt nach den in den Abschnitten 5.2 bis 5.5 angegebenen Formeln. Hier nicht dargestellte Verfahren der Längenmessung können zusätzliche Korrekturen der abgelesenen Meßwerte erforderlich machen, die in den angegebenen Formeln nicht enthalten sind.

Bei Geräten, deren Skalen in Druckeinheiten geteilt sind, muß der (gegebenenfalls reduzierten) Teilung die jeweilige gesetzliche Definition der benutzten Druckeinheit zugrunde gelegt werden. Demnach sind zu verwenden für die Quecksilberdichte der Wert  $13,5951 \text{ g/cm}^3$  bei Teilungen in Pa, mbar und Torr, für die maximale Wasserdichte der Wert  $1 \text{ g/cm}^3$  bei Teilungen in Einheiten der konventionellen

Meter Wassersäule oder gegebenenfalls auch der Wert der wahren Wasserdichte bei 20 °C für Teilungen in Pa oder mbar sowie in allen Fällen für die Normfallbeschleunigung der Wert 9,80665 m/s<sup>2</sup>. Die Bezugstemperatur der Maßstabsteilung ist 20 °C. Die an den Geräten abgelesenen Meßwerte des Drucks sind aufgrund dieser Angaben entsprechend den bei der Messung herrschenden Bedingungen zu korrigieren, d.h. die Ablesung in der jeweiligen Druckeinheit ist mit einem Faktor  $u = [1 + \alpha (t - 20 \text{ °C})] \cdot [\rho_{\text{Fl}}(t) / \rho_{\text{Fl}}(t_0)] \cdot \frac{g}{g_n}$  zu multiplizieren mit der bekannten Bedeutung der Formelzeichen. <sup>h</sup>Es ist  $\rho_{\text{Fl}}(t_0)$  der in die Skale eingearbeitete Bezugswert der Dichte der jeweiligen Manometerflüssigkeit (z.B.  $\rho_{\text{Hg}}(t_0 = 0 \text{ °C}) = 13,5951 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ). Für Wasser ist u aus Tabelle 7 zu entnehmen.

## 5 ANWENDUNG UND PRÜFUNG VON FLÜSSIGKEITSMANOMETERN

### 5.1 ALLGEMEINE PRÜFBEDINGUNGEN

Flüssigkeitsmanometer sollten bei Umgebungstemperaturen um 20 °C in klimatisierten erschütterungsfreien Räumen geprüft werden. Klimaanlage und Gebläse, die durch Luftumwälzung eine vertikale Temperaturschichtung im Meßraum verhindern, sind jedoch während der Messung außer Betrieb zu setzen, wenn der atmosphärische Luftdruck Bezugsdruck für die Messungen ist.

Es ist jedoch darauf zu achten, daß

- a) die Temperatur der Luft im Prüfraum vor und während der Messung hinreichend konstant ist,
- b) die zu prüfenden Geräte die Temperatur des Prüfraumes angenommen haben, sodaß
- c) die Temperaturen der Geräteteile, vornehmlich die Temperaturen der Sperrflüssigkeit und des Maßstabs, gleich und konstant sind, und daß
- d) dieses Temperaturgleichgewicht nicht durch Zusatzeinrichtungen wie Beleuchtungseinrichtungen und elektrische Meßmittel und auch nicht durch die im Prüfraum anwesenden Beobachter selbst gestört wird.

Für die Einstellung des Prüfdrucks gilt:

- a) Die Geräte und Verbindungselemente müssen dicht sein.
- b) Die zur Einstellung verwendeten Regel- oder Konstanthalteinrichtungen sind während der Bestimmung der Meßwerte von der Meßapparatur dicht abzutrennen.
- c) Die durch die Einstellung des jeweiligen Prüfdrucks, insbesondere bei Gasdrücken entstandene Temperaturänderung muß so weit abgeklungen sein, daß der Prüfdruck als konstant anzusehen ist.
- d) An den Geräten vorhandene oder in den Prüfdruckkreis einzuschaltende Verdrängereinrichtungen sind anzuwenden. Das Anheben der Quecksilbermenisken oder leichtes Klopfen an die Rohrwand zur verbesserten Ausbildung der Kuppen und das Absenken der Wassermenisken auf einen vorher benetzten Bereich der Rohrwand führt zu erhöhter Reproduzierbarkeit der Meßwerte.
- e) Die für den Umgang mit Druckapparaturen, Druckgasen und Quecksilber bestehenden Sicherheitsvorschriften sind zu beachten.

Auswahl des Normalgerätes und Meßwerterfassung:

Der Meßbereich des Normalgerätes soll dem des Prüflings entsprechen. Der Fehler des Normalgerätes soll im allgemeinen nicht größer sein als  $1/3$  des Fehlers des Prüflings. Zur besseren Anpassung an diese Forderung können auch 2 Normale mit verschiedenen Meßbereichen benutzt werden. Die Meßwerte des Normalgerätes sind auf die Druckbezugsebene des Prüflings umzurechnen.

Die Prüfanordnung soll so aufgebaut werden, daß die Druckbezugsebene des Prüflings und diejenige des Normals nach Möglichkeit in einer Ebene liegen. Bei nur geringer Höhendifferenz der beiden Druckbezugsebenen kann oft auf die Höhenkorrektur verzichtet werden \*).

Geprüft wird meistens an 10 gleichmäßig über den Meßbereich verteilten Prüfdrücken. Zu beachten ist die Einstellung der Flüssigkeitssäule bei der Druckdifferenz  $\Delta p = 0$ . Diese Einstellung, die mehrmals zu wiederholen ist und einen Prüfpunkt darstellt, gibt einen Hinweis auf die zu erwartende Unsicherheit der Druckmessung.

Die durch die Konstruktion und Ausführung der Skala und der Ablesevorrichtung gegebene Ablesunsicherheit sollte in das Prüfprotokoll eingetragen werden. Die Druckwerte werden erst nach der Berechnung auf- oder abgerundet.

---

\*) Hinweis: Der atmosphärische Luftdruck ändert sich um 1 mbar für den Höhenunterschied von 8,46 m unter der Voraussetzung trockener Luft von 20 °C und der Normfallbeschleunigung  $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$ .

## 5.2 DAS U-ROHR-MANOMETER

Zur Messung der absoluten Drucks, des Überdrucks und Differenzdrucks wird meist das gleichschenklige U-Rohr-Manometer als Normalgerät verwendet. Der innere Durchmesser der Rohre soll 20 mm oder mehr betragen.

### 5.2.1 SPERRFLÜSSIGKEIT QUECKSILBER; MESSUNG DES ABSOLUTEN DRUCKS

Ein Schenkel des U-Rohr-Manometers wird über geeignete Kühlfallen mit einer Vakuumpumpe, zum Beispiel einer Quecksilber-Dampfstrahlpumpe, verbunden. Der Restdruck der Gase, der kleiner als  $1 \cdot 10^{-3}$  mbar sein soll, ist mit einem Vakuummeter zu bestimmen. Geeignet sind Kompressionsvakuummeter oder Wärmeleitungsvakuummeter. Zwischen Meßgerät und dem evakuierten Schenkel des U-Rohres ist eine mit flüssiger Luft gekühlte Falle zum Abfangen des Quecksilberdampfes vorzusehen.

Den Abstand der beiden Menisken voneinander bestimmt man zweckmäßig mit einem Nivelliergerät mit vorgeschaltetem Planplattenmikrometer und einem Maßstab mit  $20^{\circ}\text{C}$  als Bezugstemperatur der Teilung. Die Fehler der Strichteilung des Maßstabes sollten bekannt sein oder die zulässigen Werte nach DIN 865 für Prüfmaßstäbe, besser die nach DIN 864 für Vergleichsstäbe, nicht überschreiten.

Die Lage der Menisken läßt sich leichter bestimmen, wenn Nivelliergeräte mit automatischer Horizontierung eingesetzt werden und hinter jedem U-Rohr-Glasschenkel ein Schrägstreifensystem angebracht ist, bestehend aus 1 mm breiten Strichen mit einem Zwischenraum von 1 mm, etwa  $70^{\circ}$  gegen die Horizontale geneigt. Die durch das Nivellier beobachtbaren Spitzen der Winkel zwischen den Streifen und ihrem von der Quecksilberoberfläche entworfenen Spiegelbild ermöglichen eine genaue Einstellung auf den höchsten Punkt des Quecksilbermeniskus. Bei der beschriebenen Anordnung beträgt die durch die Ablesung hervorgerufene Unsicherheit bei der Bestimmung des Abstandes der beiden Menisken voneinander bis zu 0,04 mm. Geräte für geringere Ansprüche an die Genauigkeit besitzen meist Rohre mit geringerem Durchmesser und die unter 4 beschriebenen Visiereinrichtungen mit einer Noniusteilung. Je nach Ausführung kann der Abstand mit einer Unsicherheit von 0,05 mm bis 0,2 mm bestimmt werden.

Für den absoluten Druck  $p_{\text{abs}}$  in der Druckbezugsebene des Prüflings gilt nach den Gleichungen (2-4), (2-7) und (2-12) die Beziehung

$$p_{\text{abs}} = g l_a [1 + \alpha(t - t_B)] \rho_{\text{Hg}}(p_m, 0^\circ\text{C}) (1 - \gamma t) + g(c - \frac{1}{2} l_a) \rho_G(p_{\text{abs}}, t).$$

$g$	lokale Fallbeschleunigung	(m/s <sup>2</sup> )
$l_a$	auf dem Maßstab abgelesener Wert für den Höhenunterschied der beiden Quecksilbermenisken	(mm)
$\alpha$	Längenausdehnungskoeffizient des Maßstabes (s.S. 5)	(°C <sup>-1</sup> )
$t$	Temperatur des Maßstabes und der Quecksilbersäule	(°C)
$t_B$	Bezugstemperatur der Maßstabsteilung	(°C)
$\rho_{\text{Hg}}(p_m, 0^\circ\text{C})$	mittlere Dichte des Quecksilbers bei dem zu messenden Druck $p_{\text{abs}}$ und der Temperatur 0 °C. Für $p_{\text{abs}} \leq 3$ bar kann $\rho_{\text{Hg}}(p_m, 0^\circ\text{C}) \approx \rho_{\text{Hg}}(p_0, 0^\circ\text{C}) = 13,5951 \text{ g/cm}^3$ gesetzt werden.	(g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_G(p_{\text{abs}}, t)$	Dichte der Luft oder des bei der Messung benutzten Gases beim Druck $p_{\text{abs}}$ und der Temperatur $t$ . Für Luft oder Stickstoff kann $\rho_G(p_{\text{abs}}, t)$ aus den Tabellen 4 und 5 und Gleichung (2-5) ermittelt werden, wobei $p_{\text{abs}} \approx (l_a / 750 \text{ mm}) \cdot \text{bar}$ gesetzt werden kann	(g/cm <sup>3</sup> )
$\gamma$	Volumenausdehnungskoeffizient des Quecksilbers	( $\gamma = 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )
$c$	Abstand der Druckbezugsebene des Prüflings von der des U-Rohr-Manometers (Ebene beider Menisken bei der Druckdifferenz $\Delta p = 0$ ). Es ist $c$ positiv, wenn die Druckbezugsebene des Prüflings unter der des U-Rohr-Manometers liegt.	(mm)

Bei Verwendung der in Klammern angegebenen Einheiten wird der absolute Druck in Pa berechnet.

Für den Fall, daß der Maßstab aus Glas mit dem Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  oder aus Messing oder Stahl besteht und die Bezugstemperatur der Teilung 20 °C ist, kann folgende Formel benutzt werden:

$$p_{\text{abs}} = g l_a \rho_{\text{Hg}}(p_0, 0^\circ\text{C}) u_{t_B}(t) + g(c - \frac{1}{2} l_a) \rho_G(p_{\text{abs}}, t)$$

$u_{t_B}(t)$  kann aus Tabelle 6 entnommen werden.

## 5.2.2 U-ROHR-MANOMETER; SPERRFLÜSSIGKEIT QUECKSILBER; MESSUNG DES ÜBERDRUCKS

Bei Messungen des Überdrucks mit positiven oder negativen Werten ist ein Schenkel des U-Rohres zur Atmosphäre geöffnet. Wenn Schwankungen des atmosphärischen Luftdrucks auftreten, die die Meßgröße beeinflussen, ist dieser Schenkel des U-Rohres mit einem auf konstanter Temperatur gehaltenen Puffervolumen zu verbinden. Es ist während der Einstellung der zu messenden Drücke zur Atmosphäre offen und wird nur für die Dauer der Ablesungen zur Bestimmung eines Meßwertes von der Atmosphäre abgetrennt ("künstliche Atmosphäre"). Zu prüfende Geräte, die nach dem Prinzip des U-Rohr-Manometers arbeiten, müssen ebenfalls an das Puffervolumen angeschlossen werden. Die Bestimmung des Abstandes beider Menisken erfolgt nach den unter 5.2.1 beschriebenen Verfahren.

Für den Überdruck  $p_e$  in der Druckbezugsebene des Prüflings gilt nach den Gleichungen (2-4), (2-6) und (2-12) die Beziehung

$$p_e = g l_a [1 + \alpha (t - t_B)] \rho_{Hg}(\rho_m, 0^\circ C) (1 - \gamma t) - g \frac{1}{2} l_a [\rho_G(p_e + p_{amb}, t) + \rho_G(p_{amb}, t)] + g c [\rho_G(p_e + p_{amb}, t) - \rho_G(p_{amb}, t)]$$

- $g$  lokale Fallbeschleunigung (m/s<sup>2</sup>)
- $l_a$  auf dem Maßstab abgelesener Wert für den Höhenunterschied der beiden Quecksilbermenisken (mm)
- $\alpha$  Längenausdehnungskoeffizient des Maßstabes (s. S. 5) (°C<sup>-1</sup>)
- $t$  Temperatur des Maßstabes und der Quecksilbersäule (°C)
- $t_B$  Bezugstemperatur der Maßstabsteilung (°C)
- $\rho_{Hg}(p_m, 0^\circ C)$  mittlere Dichte des Quecksilbers bei dem zu messenden Überdruck  $p_e$  (g/cm<sup>3</sup>) und der Temperatur 0 °C. Für  $p_e \leq 3$  bar kann  $\rho_{Hg}(p_m, 0^\circ C) \approx \rho_{Hg}(p_0, 0^\circ C) = 13,5951$  g/cm<sup>3</sup> gesetzt werden.
- $\rho_G(p, t)$  Dichte der Luft oder des bei der Messung benutzten Gases beim Druck  $p_{abs}$  oder  $p_{amb}$  und der Temperatur  $t$ . Für Luft oder Stickstoff kann  $\rho_G$  aus den Tabellen 4 und 5 und Gleichung (2-5) ermittelt werden, wobei  $p_{abs} = p_{amb} + p_e \approx p_{amb} + (l_a/750 \text{ mm}) \cdot \text{bar}$  gesetzt werden kann. (g/cm<sup>3</sup>)
- $\gamma$  Volumenausdehnungskoeffizient des Quecksilbers ( $\gamma = 1,81 \cdot 10^{-4}$  °C<sup>-1</sup>)
- $c$  Abstand der Druckbezugsebene des Prüflings von der des U-Rohr-Manometers (Ebene beider Menisken bei der Druckdifferenz  $\Delta p = 0$ ). Es ist  $c$  positiv, wenn die Druckbezugsebene des Prüflings unter der des U-Rohr-Manometers liegt. (mm)

Bei Verwendung der in Klammern angegebenen Einheiten wird der Überdruck in Pa berechnet.

Für den Fall, daß der Maßstab aus Glas mit dem Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  oder aus Messing oder Stahl besteht und die Bezugstemperatur der Teilung  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  ist, kann folgende Formel benutzt werden:

$$p_e = g l_a \rho_{\text{Hg}}(\rho_0, 0^\circ\text{C}) u_{t_B}(t) - g \frac{1}{2} l_a [\rho_G(\rho_{\text{amb}} + p_e, t) + \rho_G(\rho_{\text{amb}}, t)] \\ + g c [\rho_G(\rho_{\text{amb}} + p_e, t) - \rho_G(\rho_{\text{amb}}, t)]$$

$u_{t_B}(t)$  kann aus Tabelle 6 entnommen werden.

### 5.2.3 U-ROHR-MANOMETER; SPERRFLÜSSIGKEIT QUECKSILBER; MESSUNG DER DRUCKDIFFERENZ

Zur Messung der Druckdifferenz werden U-Rohr-Manometer in verschiedenen Ausführungen verwendet. Zum Beispiel erfordert die Messung kleiner Differenzen größerer Drücke die Verwendung von Metallrohren anstelle der Glasrohre. Dadurch werden indirekte Methoden zur Bestimmung der Lage der Menisken erforderlich. Als Normalgerät wird das gleichschenklige U-Rohr-Manometer in der Form von zwei miteinander verbundenen Gefäßen bevorzugt, die druckfeste Fenster besitzen. Ein Gefäß ist vertikal verschiebbar. Der Abstand der Menisken wird dann mit direkten Beobachtungsmethoden, wie unter 5.2.1 beschrieben, bestimmt.

Die Meßeinrichtung muß mit einer trennbaren Verbindung der Druckanschlüsse beider Gefäße zur Bestimmung des Flüssigkeitsstandes bei der Druckdifferenz  $\Delta p = 0$  ausgestattet sein. Zu beachten sind die durch die Wirkung des Drucks auftretenden Änderungen der Dichte der Gase und der Flüssigkeit.

Für die Druckdifferenz  $\Delta p = p_1 - p_2 = p_{e1} - p_{e2}$  mit  $p_1 \geq p_2$  gilt in der Druckbezugsebene des Prüflings nach den Gleichungen (2-2), (2-4) und (2-12) die folgende Beziehung, wobei  $p_1$  und  $p_2$  absolute Drücke und  $p_{e1}$  und  $p_{e2}$  die entsprechenden Überdrücke sind:

$$\Delta p = g l_a [1 + \alpha(t - t_B)] \rho_{Hg}(p_m, 0^\circ C) (1 - \gamma t) - g \frac{1}{2} l_a [\rho_G(p_1, t) + \rho_G(p_2, t)] + g c [\rho_G(p_1, t) - \rho_G(p_2, t)].$$

$g$  lokale Fallbeschleunigung (m/s<sup>2</sup>)

$l_a$  auf dem Maßstab abgelesener Wert für den Höhenunterschied der beiden Quecksilbermenisken (mm)

$\alpha$  Längenausdehnungskoeffizient des Maßstabes (s.S. 5) (°C<sup>-1</sup>)

$t$  Temperatur des Maßstabes und der Quecksilbersäule (°C)

$t_B$  Bezugstemperatur der Maßstabsteilung (°C)

$\rho_{Hg}(p_m, 0^\circ C) = \rho_{Hg}(p_0, 0^\circ C) [1 + \alpha(p_{e2} + \frac{\Delta p}{2})] \approx 13,5951 \frac{g}{cm^3} (1 + 4,04 \cdot 10^{-6} \frac{p_{e2}}{bar})$  für  $\Delta p \leq 3 bar$ ; (g/cm<sup>3</sup>)  
mittlere Dichte des Quecksilbers beim Druck  $p_{e2} + \Delta p/2$  und der Temperatur 0 °C

$\rho_G(p, t)$  Dichte der Luft oder des bei der Messung benutzten Gases beim Druck  $p_1$  oder  $p_2$  und der Temperatur  $t$ . Für Luft oder Stickstoff kann  $\rho_G$  aus den Tabellen 4 und 5 und Gleichung (2-5) ermittelt werden, wobei  $p_1 \approx p_2 + (l_a/750 \text{ mm}) \cdot bar$  gesetzt werden kann. (g/cm<sup>3</sup>)

$\gamma$  Volumenausdehnungskoeffizient des Quecksilbers ( $\gamma = 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )

c Abstand der Druckbezugsebene des Prüflings von der des U-Rohr-Manometers (Ebene beider Menisken bei der Druckdifferenz  $\Delta p = 0$ ). Es ist c positiv, wenn die Druckbezugsebene des Prüflings unter der des U-Rohr-Manometers liegt. (mm)

Bei Verwendung der in Klammern angegebenen Einheiten wird die Druckdifferenz in Pa berechnet.

Für den Fall, daß der Maßstab aus Glas mit dem Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  oder aus Messing oder Stahl besteht und die Bezugstemperatur der Teilung  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  ist, kann folgende Formel benutzt werden:

$$\Delta p = g(\rho_{\text{Hg}}(\rho_m, 0^\circ\text{C})u_b(t) - g \frac{1}{2}(\rho_G(\rho_1, t) + \rho_G(\rho_2, t)) + gc[\rho_G(\rho_1, t) - \rho_G(\rho_2, t)]).$$

$u_{t_B}(t)$  kann aus Tabelle 6 entnommen werden.

#### 5.2.4 U-ROHR-MANOMETER; SPERRFLÜSSIGKEIT WASSER; MESSUNG DES ÜBERDRUCKS

Die Meßbereichsendwerte der U-Rohr-Manometer mit der Sperrflüssigkeit Wasser sind meistens kleiner als 300 mbar. Die Dichtewerte für destilliertes und gasfreies Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur sind sehr genau bekannt.

Die erreichbare Meßgenauigkeit wird bestimmt durch die in engen Rohren unterschiedliche Einstellung der Menisken bei gleichen Drücken und durch den von den Wänden ablaufenden Wasserfilm nach einer Druckänderung. Deshalb ist eine sorgfältige Reinigung der Wände des U-Rohres erforderlich, z.B. durch längere Einwirkung von Chromschwefelsäure und anschließendes Waschen mit destilliertem Wasser und reinem Äthylalkohol. Einige Erzeugnisse der chemischen Industrie sind ebenfalls zum Reinigen der Glas- und Metalloberflächen geeignet. Zur Frage der Einstellunsicherheit vgl. auch Abschnitt 5.1 d'.

Bei Normalgeräten dürfen der Sperrflüssigkeit keine Netzmittel zur Verringerung der Oberflächenspannung beigelegt werden (Dichteänderung). Bei einfachen Geräten mit größerer Meßunsicherheit, deren Oberflächen ebenfalls zu reinigen sind, können Netzmittel zugesetzt werden. Bei der Messung ist auf die durch Projektions- oder Beleuchtungseinrichtungen bedingte Temperaturänderung zu achten. Das Temperaturgleichgewicht stellt sich unter Umständen erst einige Stunden nach dem Einschalten der Wärmequelle ein.

Die Bestimmung des Abstandes der Menisken erfolgt nach den unter 5.2.1 beschriebenen Verfahren. Zur richtigen Korrektur des an den Skalen der Geräte abgelesenen Meßwerte wird nochmals auf folgenden Sachverhalt hingewiesen:

Bei Flüssigkeitsmanometern mit Wasser als Sperrflüssigkeit werden stets Maßstäbe mit Teilungen in mm oder in mmWS verwendet. Bei der Berechnung des Drucks in Pa oder mbar ist die wirkliche Dichte des Wassers bei der Beobachtungstemperatur zu verwenden. Da bei der Definition der konventionellen Meter-Wassersäule für die Dichte der Wert  $1 \text{ g/cm}^3$  anstelle der maximalen Dichte  $0,999972 \text{ g/cm}^3$  benutzt ist, haben die Angaben des Drucks in mWS oder in mmWS einen relativen Fehler von  $3 \cdot 10^{-5}$ , der in den meisten Fällen zu vernachlässigen ist.

Bei Geräten mit Skalenteilungen in mmWS vgl. auch S. 9 und Tabelle 7.

Der Meßablauf entspricht dem des vergleichbaren Gerätes mit Quecksilberfüllung, insbesondere hinsichtlich der Verfahren zur Bestimmung des Abstandes beider Menisken.

Für den Überdruck  $p_e$  in der Druckbezugsebene des Prüflings gilt nach den Gleichungen (2-6) und (2-12) die Beziehung

$$p_e = g l_a [1 + \alpha (t - t_B)] \rho_{H_2O}(p_m, t) - g \frac{1}{2} l_a [\rho_G(p_{amb} + p_e, t) + \rho_G(p_{amb}, t)] + g c [\rho_G(p_{amb} + p_e, t) - \rho_G(p_{amb}, t)].$$

- $g$  lokale Fallbeschleunigung (m/s<sup>2</sup>)
- $l_a$  auf dem Maßstab abgelesener Wert für den Höhenunterschied der beiden Wassermenisken (mm)
- $\alpha$  Längenausdehnungskoeffizient des Maßstabes (s.S. 5) (°C<sup>-1</sup>)
- $t$  Temperatur des Maßstabes und der Wassersäule (°C)
- $t_B$  Bezugstemperatur der Maßstabsteilung (°C)
- $\rho_{H_2O}(p_m, t)$  mittlere Dichte des Wassers bei dem zu messenden Druck  $p_e$  und der Temperatur  $t$ . Für  $p_e \leq 0,2$  bar kann  $\rho_{H_2O}(p_m, t) \approx \rho_{H_2O}(p_0, t)$  gesetzt werden. Es ist  $\rho_{H_2O}(p_0, t)$  aus Tabelle 3 oder Tabelle 7 zu entnehmen. (g/cm<sup>3</sup>)
- $\rho_G(p, t)$  Dichte der Luft oder des bei der Messung benutzten Gases beim Druck  $p_{abs}$  oder  $p_{amb}$  und der Temperatur  $t$ . Für Luft oder Stickstoff kann  $\rho_G$  aus den Tabellen 4 und 5 und Gleichung (2-5) ermittelt werden, wobei  $p_{abs} = p_{amb} + p_e \approx p_{amb} + (l_a/10197 \text{ mm}) \cdot \text{bar}$  gesetzt werden kann. (g/cm<sup>3</sup>)
- $c$  Abstand der Druckbezugsebene des Prüflings von der des U-Rohr-Manometers (Ebene beider Menisken bei der Druckdifferenz  $\Delta p = 0$ ). Es ist  $c$  positiv, wenn die Druckbezugsebene des Prüflings unter der des U-Rohr-Manometers liegt. (mm)

Bei Verwendung der in Klammern angegebenen Einheiten wird der Überdruck in Pa berechnet.

5.2.5 U-ROHR-MANOMETER; SPERRFLÜSSIGKEIT WASSER; MESSUNG DER DRUCK-DIFFERENZ

Der Meßablauf entspricht dem des vergleichbaren Gerätes mit Quecksilberfüllung, insbesondere hinsichtlich der Bestimmung des Abstandes beider Menisken. Daneben gelten die einführenden Bemerkungen des Abschnitts 5.2.4.

Für die Druckdifferenz  $\Delta p = p_1 - p_2 = p_{e1} - p_{e2}$  mit  $p_1 \cong p_2$  gilt in der Druckbezugsebene des Prüflings nach den Gleichungen (2-2) und (2-12) die folgende Beziehung, wobei  $p_1$  und  $p_2$  absolute Drücke und  $p_{e1}$  und  $p_{e2}$  die entsprechenden Überdrücke sind:

$$\Delta p = g \cdot l_a [1 + \alpha(t - t_B)] \rho_{H_2O}(p_m, t) - g \frac{1}{2} l_a [\rho_G(p_1, t) + \rho_G(p_2, t)] + g c [\rho_G(p_1, t) - \rho_G(p_2, t)].$$

$g$  lokale Fallbeschleunigung (m/s<sup>2</sup>)

$l_a$  auf dem Maßstab abgelesener Wert für den Höhenunterschied der beiden Wassermenisken (mm)

$\alpha$  Längenausdehnungskoeffizient des Maßstabes (s.S. 5) (°C<sup>-1</sup>)

$t$  Temperatur des Maßstabes und der Wassersäule (°C)

$t_B$  Bezugstemperatur der Maßstabsteilung (°C)

$$\rho_{H_2O}(p_m, t) = \rho_{H_2O}(p_o, t) \cdot \left[ 1 + \frac{\gamma}{H_2O} (p_{e2} + \frac{\Delta p}{2}) \right] \approx \rho_{H_2O}(p_o, t) \cdot (1 + 47 \cdot 10^{-6} \frac{p_{e2}}{\text{bar}}) \text{ für } \Delta p \leq 0,2 \text{ bar (g/cm}^3\text{)}$$

mittlere Dichte des Wassers beim Druck  $p_{e2} + \Delta p/2$  und der Temperatur  $t$ .

Es ist  $\rho_{H_2O}(p_o, t)$  aus Tabelle 3 zu entnehmen.

$\rho_G(p, t)$  Dichte der Luft oder des bei der Messung benutzten Gases beim (g/cm<sup>3</sup>)

Druck  $p_1$  oder  $p_2$  und der Temperatur  $t$ . Für Luft oder Stickstoff kann  $\rho_G$  aus den Tabellen 4 und 5 und Gleichung (2-5) ermittelt werden, wobei  $p_1 = p_2 + (1_a/10197 \text{ mm}) \cdot \text{bar}$  gesetzt werden kann.

$c$  Abstand der Druckbezugsebene des Prüflings von der des U-Rohr-Manometers (Ebene beider Menisken bei der Druckdifferenz  $\Delta p = 0$ ). (mm)

Es ist  $c$  positiv, wenn die Druckbezugsebene des Prüflings unter der

des U-Rohr-Manometers liegt.

Bei Verwendung der in Klammern angegebenen Einheiten wird die Druckdifferenz in Pa berechnet.

Wenn hohe Stickstoff- oder Luftdrücke nicht länger als einige Stunden auf die Sperrflüssigkeit Wasser einwirken, ist die Dichteänderung durch Lösen von Gas in der Flüssigkeit zu vernachlässigen.

### 5.3 DAS GEFÄSSMANOMETER

Die Gefäßmanometer als besondere Form der U-Rohr-Manometer sind als Normalgeräte nur verwendbar, wenn die Lage beider Menisken bestimmbar ist. Geräte mit nur einer Ablesemöglichkeit, deren Richtigkeit eine bestimmte Füllmenge der Sperrflüssigkeit, die Zylindrizität des Gefäßes und Steigrohres und die richtige Reduktion der Maßstabsteilung voraussetzt, sind nur als Sekundärgeräte einzusetzen. Über die Bestimmung des Abstandes der beiden Menisken unter Berücksichtigung der Meßeinrichtung für das weite Gefäß gelten die Angaben des Abschnitts 5.2.1

#### 5.3.1 SPERRFLÜSSIGKEIT QUECKSILBER; MESSUNG DES ABSOLUTEN DRUCKS

Für den absoluten Druck  $p_{abs}$  in der Druckbezugsebene des Prüflings gilt nach den Gleichungen (2-10) und (2-12) die Beziehung

$$p_{abs} = g l_a [1 + \alpha(t - t_B)] \rho_{Hg}(p_m, 0^\circ\text{C})(1 - \gamma t) + g c \rho_G(p_{abs}, t).$$

$g$	lokale Fallbeschleunigung	( $\text{m/s}^2$ )
$l_a$	auf dem Maßstab abgelesener Wert für den Höhenunterschied der beiden Quecksilbermenisken	(mm)
$\alpha$	Längenausdehnungskoeffizient des Maßstabes (s.S. 5)	( $^\circ\text{C}^{-1}$ )
$t$	Temperatur des Maßstabes und der Quecksilbersäule	( $^\circ\text{C}$ )
$t_B$	Bezugstemperatur der Maßstabsteilung	( $^\circ\text{C}$ )
$\rho_{Hg}(p_m, 0^\circ\text{C})$	mittlere Dichte des Quecksilbers bei dem zu messenden Druck $p_{abs}$ und der Temperatur $0^\circ\text{C}$ . Für $p_{abs} = 3$ bar kann $\rho_{Hg}(p_m, 0^\circ\text{C}) \sim \rho_{Hg}(p_0, 0^\circ\text{C}) = 13,5951 \text{ g/cm}^3$ gesetzt werden.	( $\text{g/cm}^3$ )
$\rho_G(p_{abs}, t)$	Dichte der Luft oder des bei der Messung benutzten Gases beim Druck $p_{abs}$ und der Temperatur $t$ . Für Luft oder Stickstoff kann $\rho_G(p_{abs}, t)$ aus den Tabellen 4 und 5 und Gleichung (2-5) ermittelt werden, wobei $p_{abs} = (l_a/750 \text{ mm}) \cdot \text{bar}$ gesetzt werden kann.	( $\text{g/cm}^3$ )
$\gamma$	Volumenausdehnungskoeffizient des Quecksilbers	( $\gamma = 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )
$c$	Abstand der Druckbezugsebene des Prüflings von der des U-Rohr-Manometers (Ebene beider Menisken bei der Druckdifferenz $p = 0$ ). Es ist $c$ positiv, wenn die Druckbezugsebene des Prüflings unter der des U-Rohr-Manometers liegt.	(mm)

Bei Verwendung der in Klammern angegebenen Einheiten wird der absolute Druck in Pa berechnet.

Für den Fall, daß der Maßstab aus Glas mit dem Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  oder aus Messing oder Stahl besteht und die Bezugstemperatur der Teilung  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  ist, kann folgende Formel benutzt werden:

$$p_{\text{obs}} = g l \rho_{\text{Hg}} (\rho_0, 0^\circ\text{C}) u_{t_B}(t) + g c \rho_G (\rho_{\text{obs}}, t).$$

$u_{t_B}(t)$  kann aus Tabelle 6 entnommen werden.

### 5.3.2 GEFÄSSMANOMETER; SPERRFLÜSSIGKEIT QUECKSILBER; MESSUNG DES ÜBERDRUCKS

Für den Überdruck  $p_e$  in der Druckbezugsebene des Prüflings gilt nach den Gleichungen (2-9) und (2-12) die Beziehung

$$p_e = g l_a [1 + \alpha(t - t_B)] \rho_{Hg}(p_m, 0^\circ C) (1 - \gamma t) - g l_a \rho_G(p_{amb}, t) + g c [\rho_G(p_{amb} + p_e, t) - \rho_G(p_{amb}, t)]$$

$g$	lokale Fallbeschleunigung	(m/s <sup>2</sup> )
$l_a$	auf dem Maßstab abgelesener Wert für den Höhenunterschied der beiden Quecksilbermenisken	(mm)
$\alpha$	Längenausdehnungskoeffizient des Maßstabes (s.S. 5)	(°C <sup>-1</sup> )
$t$	Temperatur des Maßstabes und der Quecksilbersäule	(°C)
$t_B$	Bezugstemperatur der Maßstabsteilung	(°C)
$\rho_{Hg}(p_m, 0^\circ C)$	mittlere Dichte des Quecksilbers bei dem zu messenden Überdruck $p_e$ und der Temperatur 0 °C. Für $p_e \leq 3$ bar kann $\rho_{Hg}(p_m, 0^\circ C) \approx \rho_{Hg}(p_0, 0^\circ C) = 13,5951 \text{ g/cm}^3$ gesetzt werden.	(g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_G(p, t)$	Dichte der Luft oder des bei der Messung genutzten Gases beim Druck $p_{abs}$ oder $p_{amb}$ und der Temperatur $t$ . Für Luft oder Stickstoff kann $\rho_G$ aus den Tabellen 4 und 5 und Gleichung (2-5) ermittelt werden, wobei $p_{abs} = p_{amb} + p_e \approx p_{amb} + (l_a/750 \text{ mm}) \cdot \text{bar}$ gesetzt werden kann.	(g/cm <sup>3</sup> )
$\gamma$	Volumenausdehnungskoeffizient des Quecksilbers ( $\gamma = 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )	
$c$	Abstand der Druckbezugsebene des Prüflings von der des U-Rohr-Manometers (Ebene beider Menisken bei der Druckdifferenz $\Delta p = 0$ ). Es ist $c$ positiv, wenn die Druckbezugsebene des Prüflings unter der des U-Rohr-Manometers liegt.	(mm)

Bei Verwendung der in Klammern angegebenen Einheiten wird der Überdruck in Pa berechnet.

Für den Fall, daß der Maßstab aus Glas mit dem Längenausdehnungskoeffizienten  $\alpha = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  oder aus Messing oder Stahl besteht und die Bezugstemperatur der Teilung 20 °C ist, kann folgende Formel benutzt werden:

$$p_e = g l_a u_{t_B}(t) \rho_{Hg}(p_0, 0^\circ C) - g l_a \rho_G(p_{amb}, t) + g c [\rho_G(p_{amb} + p_e, t) - \rho_G(p_{amb}, t)]$$

$u_{t_B}(t)$  kann aus Tabelle 6 entnommen werden.

Man vergleiche auch die einführenden Bemerkungen des Abschnitts 5.2.2.

### 5.3.3 GEFÄSSMANOMETER; SPERRFLÜSSIGKEIT QUECKSILBER; MESSUNG DER DRUCKDIFFERENZ

Für die Druckdifferenz  $\Delta p = p_1 - p_2 = p_{e1} - p_{e2}$  mit  $p_1 \geq p_2$  gilt in der Druck Bezugsebene des Prüflings nach den Gleichungen (2-8) und (2-12) die folgende Beziehung, wobei  $p_1$  und  $p_2$  absolute Drücke und  $p_{e1}$  und  $p_{e2}$  die entsprechenden Überdrücke sind:

$$\Delta p = g l_a [1 + \alpha(t - t_B)] \rho_{Hg}(p_m, 0^\circ C) (1 - \gamma t) - g l_a \rho_G(p_2, t) + g c [\rho_G(p_1, t) - \rho_G(p_2, t)].$$

g	lokale Fallbeschleunigung	(m/s <sup>2</sup> )
l <sub>a</sub>	auf dem Maßstab abgelesener Wert für den Höhenunterschied der beiden Quecksilbermenisken	(mm)
α	Längenausdehnungskoeffizient des Maßstabes (s.S. 5)	(°C <sup>-1</sup> )
t	Temperatur des Maßstabes und der Quecksilbersäule	(°C)
t <sub>B</sub>	Bezugstemperatur der Maßstabsteilung	(°C)
ρ <sub>Hg</sub> (p <sub>m</sub> , 0°C)	ρ <sub>Hg</sub> (p <sub>0</sub> , 0°C) · [1 + γ <sub>Hg</sub> (p <sub>e2</sub> + $\frac{\Delta p}{2}$ )] ≈ 13,5951 $\frac{g}{cm^3}$ (1 + 4 · 10 <sup>-6</sup> $\frac{p_{e2}}{bar}$ ) für Δp ≤ 3 bar; mittlere Dichte des Quecksilbers beim Druck p <sub>e2</sub> + Δp/2 und der Temperatur 0 °C.	(g/cm <sup>3</sup> )
ρ <sub>G</sub> (p, t)	Dichte der Luft oder des bei der Messung benutzten Gases beim Druck p <sub>1</sub> oder p <sub>2</sub> und der Temperatur t. Für Luft oder Stickstoff kann ρ <sub>G</sub> aus den Tabellen 4 und 5 und Gleichung (2-5) ermittelt werden, wobei p <sub>1</sub> = p <sub>2</sub> + (l <sub>a</sub> /750 mm) · bar gesetzt werden kann.	(g/cm <sup>3</sup> )
γ	Volumenausdehnungskoeffizient des Quecksilbers	(γ = 1,81 · 10 <sup>-4</sup> °C <sup>-1</sup> )
c	Abstand der Druckbezugsebene des Prüflings von der des U-Rohr-Manometers (Ebene beider Menisken bei der Druckdifferenz Δp = 0) Es ist c positiv, wenn die Druckbezugsebene des Prüflings unter der des U-Rohr-Manometers liegt.	(mm)

Bei Verwendung der in Klammern angegebenen Einheiten wird die Druckdifferenz in Pa berechnet.

Für den Fall, daß der Maßstab aus Glas mit dem Längenausdehnungskoeffizienten α = 8,5 · 10<sup>-6</sup> °C<sup>-1</sup> oder aus Messing oder Stahl besteht und die Bezugstemperatur der Teilung 20 °C ist, kann folgende Formel benutzt werden:

$$\Delta p = g l_a u_B(t) \rho_{Hg}(p_m, 0^\circ C) - g l_a \rho_G(p_2, t) + g c [\rho_G(p_1, t) - \rho_G(p_2, t)]$$

u<sub>B</sub>(t) kann aus Tabelle 6 entnommen werden.

Man vergleiche auch die einführenden Bemerkungen des Abschnitts 5.2.3.

5.3.4 GEFÄSSMANOMETER MIT SPERRFLÜSSIGKEIT WASSER - MESSUNG DES ÜBERDRUCKS

Geräte mit nur einer Ablesemöglichkeit sind als Normalgeräte nicht geeignet (siehe Vorbemerkung zu 5.3). Die hohe Auflösung bei den meisten Geräten dieser Bauart wird durch Flüssigkeitsverluste an den benetzten Oberflächen in Frage gestellt. Für Messungen mit Geräten dieser Bauart gelten auch die einführenden Angaben unter 5.2.4 über die Messung des Überdrucks unter Verwendung der Sperrflüssigkeit Wasser.

Für den Überdruck  $p_e$  in der Druckbezugsebene des Prüflings gilt nach den Gleichungen (2-9) und (2-12) die Beziehung

$$p_e = g l_a [1 + \alpha(t - t_B)] \rho_{H_2O}(p_m, t) - g l_a \rho_G(p_{amb}, t) + g c [\rho_G(p_{amb} + p_e, t) - \rho_G(p_{amb}, t)].$$

- $g$  lokale Fallbeschleunigung (m/s<sup>2</sup>)
- $l_a$  auf dem Maßstab abgelesener Wert für den Höhenunterschied der beiden Wassermenisken (mm)
- $\alpha$  Längenausdehnungskoeffizient des Maßstabes (s.S. 5) (°C<sup>-1</sup>)
- $t$  Temperatur des Maßstabes und der Wassersäule (°C)
- $t_B$  Bezugstemperatur der Maßstabsteilung (°C)
- $\rho_{H_2O}(p_m, t)$  mittlere Dichte des Wassers bei dem zu messenden Druck  $p_e$  und der Temperatur  $t$ . Für  $p_e \leq 0,2$  bar kann  $\rho_{H_2O}(p_m, t) \approx \rho_{H_2O}(p_0, t)$  gesetzt werden. Es ist  $\rho_{H_2O}(p_0, t)$  aus Tabelle 3 oder Tabelle 7 zu entnehmen. (g/cm<sup>3</sup>)
- $\rho_G(p, t)$  Dichte der Luft oder des bei der Messung benutzten Gases beim Druck  $p_{abs}$  oder  $p_{amb}$  und der Temperatur  $t$ . Für Luft oder Stickstoff kann  $\rho_G$  aus den Tabellen 4 und 5 und Gleichung (2-5) ermittelt werden, wobei  $p_{abs} = p_{amb} + p_e = p_{amb} + (l_a/10197 \text{ mm}) \cdot \text{bar}$  gesetzt werden kann. (g/cm<sup>3</sup>)
- $c$  Abstand der Druckbezugsebene des Prüflings von der des U-Rohr-Manometers (Ebene beider Menisken bei der Druckdifferenz  $\Delta p = 0$ ). Es ist  $c$  positiv, wenn die Druckbezugsebene des Prüflings unter der des U-Rohr-Manometers liegt. (mm)

Bei Verwendung der in Klammern angegebenen Einheiten wird der Überdruck in Pa berechnet.

### 5.3,5 GEFÄSSMANOMETER; SPERRFLÜSSIGKEIT WASSER; MESSUNG DER DRUCKDIFFERENZ

Geräte mit nur einer Ablesemöglichkeit sind als Normalgeräte nicht geeignet (siehe Vorbemerkung zu 5.3). Die hohe Auflösung bei den meisten Geräten dieser Bauart wird durch Flüssigkeitsverluste an den benutzten Oberflächen in Frage gestellt. Für Messungen mit Geräten dieser Bauart gelten auch die einführenden Angaben der Abschnitte 5.2.3 und 5.2.4.

Für die Druckdifferenz  $\Delta p = p_1 - p_2 = p_{e1} - p_{e2}$  mit  $p_1 \geq p_2$  gilt in der Druckbezugsebene des Prüflings nach den Gleichungen (2-8) und (2-12) die folgende Beziehung, wobei  $p_1$  und  $p_2$  absolute Drücke und  $p_{e1}$  und  $p_{e2}$  die entsprechenden Überdrücke sind:

$$\Delta p = g l_a [1 + \alpha(t - t_B)] \rho_{H_2O}(p_m, t) - g l_a \rho_G(p_2, t) + g c [\rho_G(p_1, t) - \rho_G(p_2, t)]$$

g	lokale Fallbeschleunigung	(m/s <sup>2</sup> )
l <sub>a</sub>	auf dem Maßstab abgelesener Wert für den Höhenunterschied der beiden Wassermenisken	(mm)
α	Längenausdehnungskoeffizient des Maßstabes (s.S. 5)	(°C <sup>-1</sup> )
t	Temperatur des Maßstabes und der Wassersäule	(°C)
t <sub>B</sub>	Bezugstemperatur der Maßstabsteilung	(°C)
$\rho_{H_2O}(p_m, t) = \rho_{H_2O}(p_o, t) \cdot [1 + \beta_{H_2O}(p_{e2} + \frac{\Delta p}{2})] \approx \rho_{H_2O}(p_o, t) \cdot (1 + 47 \cdot 10^{-6} \frac{p_{e2}}{\text{bar}})$	für $\Delta p \leq 0,2$ bar; mittlere Dichte des Wassers beim Druck $p_{e2} + \Delta p/2$ und der Temperatur t. Es ist $\rho_{H_2O}(p_o, t)$ aus Tabelle 3 zu entnehmen.	(g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_G(p, t)$	Dichte der Luft oder des bei der Messung benutzten Gases beim Druck $p_1$ oder $p_2$ und der Temperatur t. Für Luft oder Stickstoff kann $\rho_G$ aus den Tabellen 4 und 5 und Gleichung (2-5) ermittelt werden, wobei $p_1 \approx p_2 + (1_a/10197 \text{ mm}) \cdot \text{bar}$ gesetzt werden kann.	(g/cm <sup>3</sup> )
c	Abstand der Druckbezugsebene des Prüflings von der des U-Rohr-Manometers (Ebene beider Menisken bei der Druckdifferenz $\Delta p = 0$ . Es ist c positiv, wenn die Druckbezugsebene des Prüflings unter der des U-Rohr-Manometers liegt.	(mm)

Bei Verwendung der in Klammern angegebenen Einheiten wird die Druckdifferenz in Pa berechnet.

## 5.4 DAS SCHWIMMERMANOMETER <https://doi.org/10.7795/510.202007161>

Schwimmermanometer werden in den Bauformen U-Rohr-Manometer und Gefäßmanometer zur Messung von Überdrücken und Differenzdrücken, seltener zur Messung absoluter Drücke eingesetzt. Die Lage des meist nur auf einem Schenkel des Flüssigkeitsmanometers angeordneten Schwimmers wird mit optischen, elektrischen oder magnetischen Meßmitteln bestimmt und auf einen Maßstab übertragen, oder der Maßstab ist direkt mit dem Schwimmer verbunden. Bei Quecksilbergeräten steht er auf dem Schwimmer und wird leicht geführt, bei Geräten mit Wasserfüllung hängt der Maßstab im Wasser unter dem Schwimmer. Die Maßstabsskala wird in beiden Fällen z.B. auf eine Mattscheibe mit einer von 0 bis 1 in Zehntel geteilten Skala projiziert. Bei Gefäßmanometern nach Abb. 2 ist der Maßstab mit einer reduzierten Teilung mit dem Reduktionsfaktor  $(1 - d^2/D^2)$  versehen. Bei U-Rohr-Manometern trägt er eine mm-Teilung. Der bei einer Druckmessung abgelesene Zahlenwert ist dabei mit dem Faktor 2 zu multiplizieren, wenn er nicht bereits bei der Bezifferung der Skala berücksichtigt wurde. Geräte mit Teilungen in Druckeinheiten werden ebenfalls verwendet.

Als Primärnormale sind diese Bauarten nicht geeignet. Als Sekundärnormale sind sie unter folgenden Bedingungen einsetzbar:

Für die Messung des Überdrucks:

- a) Die Lage des Schwimmers beim Überdruck  $p_e = 0$  muß bestimmbar oder die Nullmarke der Ableseeinrichtung (s.o.) muß auf den Nullpunkt der Skala einstellbar sein.
- b) Gefäße und Steigrohre müssen hinreichend veredelte und gesäuberte Oberflächen besitzen, damit das Anhaften von Sperrflüssigkeit weitgehend verhindert wird.
- c) Die Temperatur der Sperrflüssigkeit muß bestimmbar sein. Der Einfluß der Beleuchtungs-, Beobachtungs- und Projektionseinrichtungen auf die Temperatur des Gerätes muß gering sein oder das Temperaturgleichgewicht muß sich vor der Messung eingestellt haben.
- d) Bei einer in Druckeinheiten geteilten Skala müssen die dieser Teilung zugrundeliegenden Konstanten (Bezugstemperatur der Maßstabsteilung, Dichte der Flüssigkeit und Fallbeschleunigung) bekannt sein.
- e) Der Schwimmer soll sich bei Wasser als Sperrflüssigkeit während der Ablesung in einem vorher benetzten Bereich des Steigrohres befinden, d.h. die zu messenden Drücke sind von höheren Drücken her einzustellen. Bei der Sperrflüssigkeit Quecksilber ist umgekehrt zu verfahren.

Für die Messung von Druckdifferenzen bei höherem statischen Druck:

- a) Die Meßeinrichtungen müssen eine trennbare Verbindung zwischen beiden Druckanschlüssen zur Bestimmung des Flüssigkeitsstandes beim Differenzdruck  $p = 0$  haben.
- b) Die Anschlüsse für die Drücke  $p$  und  $p + \Delta p$  sind im allgemeinen nicht vertauschbar. Eine entsprechende Kennzeichnung ist daher zu beachten.
- c) Die Lageänderung des Schwimmers, die durch Formänderung des Manometergefäßes und des Schwimmers selbst als Folge des statischen Druckes hervorgerufen wird, muß für die Druckdifferenz  $\Delta p = 0$  direkt bestimmbar sein oder durch Nachführen einer Nullmarke der Ableseeinrichtung auf die Nullmarke der Maßstabsskala oder durch Anwendung einer Korrektionsstafel in Abhängigkeit vom jeweiligen statischen Druck korrigierbar sein.
- d) Die Abhängigkeit der Gas- und Flüssigkeitsdichten vom statischen Druck ist zu beachten.
- e) Die Sicherheitsbestimmungen sind zu beachten.

Für die Berechnung des absoluten Druckes gilt die Gleichung

unter 5.2.1 für die Sperrflüssigkeit Quecksilber.

Für die Berechnung des Überdrucks gelten die Gleichungen

unter 5.2.2 für die Sperrflüssigkeit Quecksilber und  
unter 5.2.4 für die Sperrflüssigkeit Wasser.

Für die Berechnung des Differenzdruckes gelten die Gleichungen

unter 5.2.3 für die Sperrflüssigkeit Quecksilber und  
unter 5.2.5 für die Sperrflüssigkeit Wasser.

Bei Differenzdruckmessungen unter hohem statischen Druck ist das den Meßstab betreffende Glied der Formeln unter 5.2.3 und 5.2.5

$$l_0 [1 + \alpha(t - t_0)] \quad \text{zu ersetzen durch} \quad l_0 [1 + \alpha(t - t_0) - \frac{1}{3} \chi p_e]$$

Dabei ist  $\chi$  die Kompressibilität des Werkstoffes der die Teilung tragenden Skala,  $p_e$  der statische Überdruck.

## 5.5 FLÜSSIGKEITS-MIKROMANOMETER

Flüssigkeits-Mikromanometer basieren auf dem Prinzip der U-Rohr- oder Gefäßmanometer. Sie dienen zur Messung von absoluten Drücken, positiven und negativen Überdrücken und Differenzdrücken im Bereich unterhalb von  $10^4$  Pa. Sperrflüssigkeiten sind Quecksilber, Wasser, Öle und Alkohole. Die Methoden zur Bestimmung der Lage der Menisken entsprechen den unter Nr. 4 beschriebenen. Als Maßzeuge für den Abstand der Menisken dienen neben Maßstäben auch Meßspindeln (Mikrometerschrauben), mit denen eine Metallspitze auf die Höhe der Meniskenoberflächen eingestellt werden kann. Verwendet werden auch Geräte, bei denen das Steigrohr als Meßkappillare ausgebildet ist. Kleinere Meßbereiche des Gerätes lassen sich durch Neigen des Steigrohres aus der senkrechten Stellung einstellen. Bei der Prüfung der Geräte sind zu beachten:

1. Die Hinweise für die Prüfung von U-Rohr-Manometern oder Gefäßmanometern.
2. Längere Wartezeiten, die auch durch das langsame Fließen der Sperrflüssigkeit unter der kleinen Druckdifferenz bedingt sind, können durch Verbindungen mit großer lichter Weite verkürzt werden.
3. Der zulässige Fehler für die verwendete Meßspindel (DIN 863).
4. Der zulässige Fehler für den verwendeten Maßstab (DIN 864 und DIN 865).
5. Die Reproduzierbarkeit der Einstellung der Menisken bei gleichem Prüfdruck, die bei Mikromanometern meist geringer ist als die Ableseunsicherheit an den verwendeten Meßzeugen zur Bestimmung des Abstandes der Menisken.

Für die Berechnung der absoluten Drücke, der Überdrücke und der Druckdifferenzen gelten je nach Bauart des Mikromanometers die entsprechenden Gleichungen und Tabellenwerte, die unter 5.2 für U-Rohr-Manometer und unter 5.3 für Gefäßmanometer angegeben sind. Über die Möglichkeiten von Vereinfachungen des Berechnungsverfahrens muß im Einzelfall entschieden werden. Wegen des geringen Meßbereichs der Mikromanometer kann z.B. oft auf die Berücksichtigung von Temperaturkorrekturen für Maßstab und Flüssigkeitsdichte verzichtet werden.

## 5,6 DAS TAUCHGLOCKEN-MANOMETER

Zur Messung kleiner positiver oder negativer Überdrücke bis ca. 2000 Pa werden Tauchglocken mit den Sperrflüssigkeiten Nonan oder Dekalin auch als Normalgeräte verwendet. Besonderer Vorteil dieser Druckmeßgeräte ist ihre Wirkung als Manostate in Prüfanordnungen mit kleinen angeschlossenen Druckräumen. Die Reproduzierbarkeit der Messung der Überdrucks ist so groß, daß mit diesem Gerät Flüssigkeitsmanometer anderer Bauart auf ihre Einstellfehler, z.B. bei unterschiedlicher Benetzung, untersucht werden können. Bei der Prüfung der Geräte müssen die notwendigen Wartezeiten zum Ausgleich geringer Druckdifferenzen eingehalten werden. Zum Vergleichsgerät sind weite Verbindungsleitungen vorzusehen. Ferner ist auf die richtige Füllmenge der Sperrflüssigkeit zu achten. Sie ist meist durch die Lage eines Abflußventils bestimmt und stellt die Ebene dar, auf die sich die Angabe des wirksamen Querschnitts der Tauchglocke für  $\Delta p = 0$  bezieht. Ändert sich der wirksame Querschnitt in Abhängigkeit vom Druck, d.h. von der jeweiligen Höhe der Flüssigkeit im Innern der Glocke, so ist dies zu berücksichtigen.

Berechnung des Überdrucks  $p_e$  für die Druckbezugsebene des Prüflings:

$$p_e = g \frac{m}{A_{eff}(p_e, t)} \left[ 1 - \frac{0,0012 \text{ g cm}^{-3}}{\rho_m} \right] + g c (\rho_G(p_{amb} + p_e, t) - \rho_G(p_{amb}, t)) \quad (\text{m/s}^2)$$

$g$  lokale Fallbeschleunigung

$m$  Masse der Auflagen

$A_{eff}(p_e, t) = A_0^{20} \cdot [1 + 2\alpha(t - t_B)] \cdot u(p_e)$  effektiver Querschnitt der Tauchglocke.  $(\text{m}^2)$

$A_0^{20}$  ist der effektive Querschnitt bei der Bezugstemperatur 20 °C.

$\alpha$  ist der Längenausdehnungskoeffizient des Materials der Glocke.

Der Korrektionsfaktor  $u(p_e)$  beschreibt die Abhängigkeit des effektiven Querschnitts vom Überdruck  $p_e$  als Folge der Abweichungen des Tauchkörpers von der idealen Zylinderform, für die  $u=1$  ist. Der Zahlenwert für  $u(p_e)$  muß einer Tabelle entnommen werden, die dem Gerät beigegeben ist.

$\rho_G(p, t)$  Dichte der Luft oder des bei der Messung benutzten Gases beim Druck  $p_{abs}$  oder  $p_{amb}$  und der Temperatur  $t$ . Für Luft oder Stickstoff kann  $\rho_G$  aus den Tabellen 4b oder 5 und Gleichung (2-5) ermittelt werden, wobei wegen des kleinen Meßbereichs der Tauchglockenmanometer der Einfluß von  $p_e$  auf die Gasdichte vernachlässigbar ist:  $\rho_G(p_{amb} + p_e, t) \approx \rho_G(p_{amb}, t)$

$\rho_m$  Dichte der Auflagen  $(\text{g/cm}^3)$

$c$  Abstand der Druckbezugsebene des Prüflings von der des Tauchglockenmanometers (Ebene des Flüssigkeitsspiegels für  $\Delta p=0$ ). Es ist  $c$  positiv, wenn die Druckbezugsebene des Prüflings unter der des Tauchglockenmanometers liegt.  $(\text{mm})$

Bei Verwendung der in Klammern angegebenen Einheiten wird der Überdruck in Pa berechnet.

## 6. BAUARTEN DER BAROMETER

Quecksilberbarometer mit offenem Gefäß dienen zur Messung des atmosphärischen Luftdrucks  $p_{amb}$ . Quecksilberbarometer mit druckdichtem Gefäß (Kontroll- und Prüfbarometer) dienen zur Messung des absoluten Drucks  $p$ , z.B. des Drucks in Behältern, in denen Druckmeßgeräte, wie z.B. Höhenmesser, bis herab zu etwa 50 mbar geprüft werden können.

"Gefäßbarometer" oder "Fortinbarometer" sind Geräte mit feststehender oder beweglicher Skala, deren Nullmarke meist als Spitze ausgebildet ist. Durch Verschieben der Skala oder durch Heben bzw. Senken der Quecksilberoberfläche mit einer Verdrängereinrichtung ist das Gerät so einzustellen, daß der Abstand zwischen der Nullmarke und ihrem auf der Quecksilberoberfläche sichtbaren Spiegelbild möglichst klein wird.

Gefäß- oder Fortinbarometer

Skalenwerkstoff	Bezugstemp. der Teilung	Meßbereich ca.		Skalenwert		Ablesemöglichkeit		Rohrinnendurchmesser im Ablesebereich (mm)
		mbar	Torr	mbar	Torr	mbar	Torr	
Messing oder Stahl	0 °C	850 ÷ 1050	600 ÷ 800	1	1	0,1	0,1	8

Wird als Bezugstemperatur der Teilung 20 °C gewählt, so ist die Bezugstemperatur auf der Skala anzugeben.

"Stationsbarometer" und "Prüfbarometer" sind Gefäßbarometer, bei denen der Abstand zwischen den Menisken durch Ablesung des Standes des Meniskus am Steigrohr bestimmt wird. Die Änderung des Standes des Meniskus im Gefäß beim Steigen oder Fallen des Drucks ist in der Teilung des Maßstabes durch einen Reduktionsfaktor  $(1 - d^2/D^2)$  berücksichtigt. Der mit diesen Geräten gemessene Druck ist nur bei

einer bestimmter Füllmenge Quecksilber richtig, die bekannt sein muß.

Prüfbarometer haben ein druckdichtes Gefäß. Der Meßbereich ist nach kleineren Drücken erweitert.

Stationsbarometer sind nach DIN 8896 (Dezember 1969) genormt. Stationsbarometer, bei denen ein großer Teil des Steigrohres eine Kapillare zur Dämpfung der Bewegung des Quecksilbers ist, werden als "Schiffsbarometer" in einer besonderen Aufhängevorrichtung verwendet.

#### Stationsbarometer und Prüfbarometer

Bezeichnung	Skalenwerkstoff	Bezugstemperatur der Teilung	Meßbereich		Skalenwert		Ablesemöglichkeit		Rohrinnendurchmesser im Ablesebereich (mm)
			mbar	Torr	mbar	Torr	mbar	Torr	
Stationsbarometer	Messing	0 °C	800 ±1100	600 ±800	1	1	0,1	0,1	8
Prüfbarometer	Messing	0 °C	55 ±1100	40 ±820	1	1	0,1	0,1	6-8

Wird als Bezugstemperatur der Teilung 20 °C gewählt, so ist die Bezugstemperatur auf der Skala anzugeben.

"Normalbarometer" und "Kontrollbarometer" sind Gefäßheberbarometer mit gleichweiten Schenkeln und einer Verdrängervorrichtung zum Einstellen des unteren Meniskus auf die untere Visiereinrichtung, die meistens auf die Nullmarke der Skalenteilung eingestellt ist.

#### Normalbarometer und Kontrollbarometer

Bezeichnung	Skalenwerkstoff	Bezugstemperatur der Teilung	Meßbereich		Skalenwert		Ablesemöglichkeit		Rohrinnendurchmesser im Ablesebereich (mm)
			mbar	Torr	mbar	Torr	mbar	Torr	
Normalbarometer	Messing	0 °C	850 ±1100	650 ±820	1	1	0,05	0,05	14
Kontrollbarometer	Messing	0 °C	55 ±1100	40 ±820	1	1	0,05	0,05	11

Die Lage des Quecksilbermeniskus wird bei allen Gerätetypen mit einer Visiereinrichtung auf die Skala übertragen. Die Visiereinrichtung wird nach der Methode des kleinsten Lichtspaltes auf den höchsten Punkt der Quecksilberkuppe eingestellt (Unsicherheit 0,02 mm bis 0,03 mm), wobei eine Noniuseinrichtung das Ablesen

der Skala erleichtert. Die Güte eines Barometers wird durch den Restdruck im Steigrohr und durch die vom Rohrdurchmesser an der Ablesestelle abhängige Kapillardepression bestimmt: Kleinere Rohrdurchmesser bewirken eine größere Unsicherheit der entsprechenden Korrektur. Der Meniskus, dessen Kuppenhöhe für die Angabe der Kapillardepression zu messen ist, bildet sich besser aus, wenn das Quecksilber durch eine Verdrängervorrichtung (Gefäßheberbarometer) um einige Millimeter angehoben wird. \*/vgl. Tab.8

Zusatzeinrichtungen an einigen Bauarten:

- a) Vorrichtung zur Bestimmung der Kuppenhöhe, bestehend aus einer planparallelen Glasplatte, Hebelsystem und Trommelskala. Die Glasplatte ist so zu neigen, daß der hierdurch beobachtete Rand des Meniskus in gleicher Höhe mit der Kuppe des Quecksilbermeniskus erscheint
- b) Luftfalle (Buntensche Spitze) zur Verhinderung des Eindringens von Luft in den evakuierten Raum im Steigrohr
- c) Einige Stationsbarometer haben eine zusätzliche Bohrung am Rand der Zwischenplatte aus Gußeisen im Gefäß, durch die die nach dem Umdrehen des Gerätes in die Gebrauchslage zurückgebliebene Luft entweichen kann. Die Lage der Bohrung ist außen am Gefäß gekennzeichnet.

## 7. PRÜFUNG DER BAROMETER

### 7.1 ALLGEMEINE PRÜFBEDINGUNGEN

Für Barometer gelten ebenfalls die unter 5.1 angegebenen allgemeinen Prüfbedingungen für Flüssigkeitsmanometer.

Bei Geräten mit einem nicht druckdichten Gefäß - Stationsbarometer, Fortinbarometer, Gefäßheberbarometer - wird als Normal ein Gefäßheberbarometer verwendet. Der Vergleich bei atmosphärischem Luftdruck erstreckt sich mit mindestens 10 Messungen über einige Tage mit unterschiedlichem Luftdruck. Im Prüfungsschein wird der Betrag angegeben, um den das Barometer im gemessenen Bereich im Mittel zu hoch oder zu niedrig anzeigt (Standkorrektur). Ebenfalls sind die Fehler des zum Gerät gehörenden Thermometers und beim Stationsbarometer die Masse des Quecksilbers im Gefäß anzugeben. Ersatzweise kann das Barometer selbst in Gebrauchslage gewogen werden. Dann ist anzugeben, welche austauschbaren Einzelteile dabei mit erfaßt wurden.

Für den Vergleich über einen größeren Skalenbereich ist das Barometer in einen druckdichten Behälter zu setzen, der Glasfenster im Bereich der Skala besitzt. Als Normal ist ein Gefäßheberbarometer mit druckdichtem Gefäß (Kontrollbarometer) oder ein U-Rohr-Manometer an den Behälter anzuschließen. An 10 gleichmäßig über den Meßbereich verteilten Skalenstellen ist der Vergleich durchzuführen.

Geräte mit druckdichtem Gefäß (Prüfbarometer, Kontrollbarometer) werden über den gesamten Meßbereich mit einem U-Rohr-Manometer verglichen. Dieser Vergleich wird an 10 gleichmäßig über den Skalenbereich verteilten Stellen durchgeführt. Eine zusätzliche Prüfung im Abwärtsgang gibt Aufschluß über die Einstellunsicherheit einzelner Druckwerte.

Im Prüfungsschein ist für die einzelnen Skalenstellen anzugeben, um welchen Betrag die Angaben des Prüflings von denen des Normals abweichen. Außerdem ist die durch die Konstruktion der Skala und der Ablesevorrichtung gegebene Ableseunsicherheit anzugeben. Rundungen werden erst nach Abschluß der Druckberechnung angebracht.

Der Restdruck im evakuierten, abgeschlossenen Raum oberhalb der Flüssigkeitssäule im Steigrohr, der abgesehen vom Dampfdruck des Quecksilbers nicht größer als  $1 \cdot 10^{-3}$  mbar sein soll, läßt sich nur bei Spezialgeräten messen. Eine Zunahme des Absolutbetrages des Fehlers bei höherem Druck (Abnahme des Gasvolumens im Steigrohr) kann durch einen zu großen Restdruck bedingt sein.

Die Vorschriften der Gebrauchsanweisung für die einzelnen Gerätetypen sind zu beachten, insbesondere hinsichtlich folgender Besonderheiten:

- a) Verschußschrauben im Gefäßboden für den Transport der Stationsbarometer und für das beim Gebrauch senkrecht hängende Barometer.
- b) Verschußmöglichkeit der Fortinbarometer für den Transport des Gerätes.
- c) Beachtung der Drehrichtung beim Drehen des Gefäßheberbarometers um  $180^\circ$  bei Inbetriebnahme und beim Abbau für den Transport.

## 7.2 DRUCKMESSUNG MIT BAROMETERN (SKALA IN MBAR ODER TORR GETEILT)

Die Berechnung des absoluten Drucks in der Druck Bezugsebene der Barometer<sup>x)</sup> erfolgt aufgrund der Gleichungen (2-11) bis (2-14) am einfachsten nach der Zahlenwertgleichung (2-14):

$$p_{\text{abs}} = \frac{g}{g_n} l_a u_{t_B}(t) \quad (\text{m/s}^2)$$

$g$	lokale Fallbeschleunigung	$(\text{m/s}^2)$
$g_n$	Normfallbeschleunigung $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$	
$l_a$	der Länge der Quecksilbersäule entsprechende Ablesung an einem Maßstab, der in mbar, in Torr oder in mm geteilt ist.	
$u_{t_B}$	$= 1 - \frac{\gamma t - \alpha(t - t_B)}{1 + \gamma t}$	(Zahlenwerte in Tab. 6)
$\gamma$	Volumenausdehnungskoeffizient des Quecksilbers	$(\gamma = 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
$\alpha$	Längenausdehnungskoeffizient des Maßstabes. Zahlenwerte für die gebräuchlichen Maßstabmaterialien:	$(^\circ\text{C}^{-1})$
	$\alpha_{\text{Ms}} = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \alpha_{\text{St}} = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \alpha_{\text{Gl}} = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	
$t$	Temperatur des Maßstabes und der Quecksilbersäule	$(^\circ\text{C})$
$t_B$	Bezugstemperatur der Maßstabsteilung	$(^\circ\text{C})$

<sup>x)</sup> Anmerkung:

Die oben angegebene Zahlenwertgleichung zur Berechnung des absoluten Drucks gilt nicht nur für Barometer, die als Gefäßmanometer ausgebildet sind (Stations- oder Prüfbarometer), sondern auch für Barometer, die als U-Rohr-Manometer ausgebildet sind (Normal- oder Kontrollbarometer). Bei letzteren liegt jedoch dann die Druck Bezugsebene wie bei den Gefäßmanometern in Höhe des unteren Quecksilbermeniskus, im Gegensatz zu der sonst bei U-Rohr-Manometern üblichen Festlegung:

Man hat in der unter 5.2.1 angegebenen Beziehung für die Berechnung des absoluten Drucks beim U-Rohr-Manometer  $c = 1/2$  und  $p_{\text{Hg}}(p_m, 0^\circ\text{C}) \approx p_{\text{Hg}}(p_0, 0^\circ\text{C})$  einzusetzen. Die Beziehung wird dann mit Gleichung (2-15) identisch, aus der Gleichung (2.14) in der oben angegebenen Form folgt. Aus dieser Überlegung ergibt sich auch die an Gleichung (2-14) anzubringende Korrektur für den Fall, daß der Druck nicht in der Druck Bezugsebene des Barometers gemessen werden soll.

Korrektion von  $l_a$ :

- a) Bei bekanntem Teilungsfehler des Maßstabes ist der abgelesene Wert von  $l_a$  entsprechend zu korrigieren.
- b) Bei Stationsbarometern und Prüfbarometern wird die durch Temperaturänderung hervorgerufene Höhenänderung der Quecksilberoberfläche im Gefäß durch ein additives Glied  $- a \cdot (V_o/A_o) \cdot (\gamma - 3\alpha_1) \cdot t$  zum Betrag von  $l_a$  berücksichtigt.

$a = 1$  bei Geräten mit in Torr oder in mm geteilten Maßstäben,

$a = 1,333$  bei Geräten mit in mbar geteilten Maßstäben,

$A_o$  effektiver Querschnitt des Gefäßes bei  $0^\circ\text{C}$ , ( $\text{mm}^2$ )

$V_o$  Volumen des gesamten im Barometer enthaltenen Quecksilbers bei  $0^\circ\text{C}$ , ( $\text{mm}^3$ )

$\alpha_1$  Längenausdehnungskoeffizient des Gefäßwerkstoffs, ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )  
für Gußeisen:  $10 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , für Stahl 12CrNi188:  $17 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

Hinweis: Der Wert des Quotienten  $V_o/A_o$  ist vom Hersteller des Barometers auf einem am Gerät angebrachten Schild anzugeben.

<https://doi.org/10.7795/510.20200716I>

8    Ầ N H Ầ N G

## 8.1 DRUCK - DEFINITIONEN UND EINHEITEN

Der Druck  $p$  ist der Quotient aus der Normalkraft  $F_N$ , die auf eine Fläche wirkt, und dem Inhalt  $A$  dieser Fläche

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

Die abgeleitete SI-Einheit der Kraft ist das Newton. Es ist 1 Newton die Kraft, die einen Körper der Masse 1 kg die Beschleunigung  $1 \text{ m/s}^2$  erteilt.

Die abgeleitete SI-Einheit (Système International d'Unités) ist das Newton durch Quadratmeter, das mit Pascal bezeichnet wird.

Danach ist 1 Newton/Quadratmeter der Druck, den eine auf eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$  senkrecht wirkende gleichmäßig verteilte Kraft von 1 Newton ausübt.

Zugelassene Einheiten sind

- a) Newton/Quadratmeter (Einheitenzeichen:  $\text{N/m}^2$ ),
- b) das Pascal (Einheitenzeichen: Pa),
- c) das Bar (Einheitenzeichen: bar).

Diese Einheiten können in Verbindung mit den zulässigen Vorsätzen zur Bezeichnung dezimaler Teile und Vielfache der Druckeinheit benutzt werden.

Bis Ende des Jahres 1977 durften noch folgende Druckeinheiten verwendet werden<sup>1)</sup>:

- a) das Kilopond/Quadratcentimeter (Einheitenzeichen:  $\text{kp/cm}^2$ ),  
(auch technische Atmosphäre (Einheitenzeichen: at) genannt)
- b) die physikalische Atmosphäre (Einheitenzeichen: atm),
- c) das Torr (Einheitenzeichen: Torr),
- d) die konventionelle Meter-Wassersäule (Einheitenzeichen: mWs),
- e) die konventionelle Millimeter-Quecksilbersäule (Einheitenzeichen: mmHg).

In Tabelle 1 sind die Umrechnungsfaktoren für einige Druckeinheiten zusammengestellt. Mit angegeben ist die in englisch sprechenden Ländern noch verwendete Druckeinheit pound-force per square inch (Einheitenzeichen:  $\text{lbf/in}^2$  oder psi).

---

<sup>1)</sup> Ausnahmen sind durch die Übergangsvorschriften der Eichordnung geregelt.

Einheitenname	Einheiten- zeichen	Beziehung
Newton/Quadratmeter	N/m <sup>2</sup>	1 N/m <sup>2</sup> = 1 Pa
Bar	bar	1 bar = 0,1 MPa = 10 <sup>5</sup> Pa
Millibar	mbar	1 mbar = 0,1 kPa = 10 <sup>2</sup> Pa
Kilopond/Quadratzentimeter	kp/cm <sup>2</sup>	1 kp/cm <sup>2</sup> = 98066,5 Pa = 0,980665 bar
technische Atmosphäre	at	1 at = 98066,5 Pa = 0,980665 bar
physikalische Atmosphäre	atm	1 atm = 101325 Pa = 1,01325 bar
Torr	Torr	1 Torr = $\frac{1 \text{ atm}}{760}$ = 133,322 Pa = 1,33322 mbar
konventionelle Millimeter- Quecksilbersäule	mmHg	1 mmHg = 133,22 Pa = 1,33322 mbar
konventionelle Meter Wassersäule	mWS	1 mWS = 9806,65 Pa = 98,0665 mbar
pound-force per square inch	lbf/in <sup>2</sup> oder psi	1 psi = 6894,752 Pa = 68,94752 mbar

Anmerkung: Die physikalische Atmosphäre entspricht dem Druck, den eine 760 mm lange Quecksilbersäule der Dichte 13,5951 g/cm<sup>3</sup> (bei 0 °C) unter der Normfallbeschleunigung 9,80665 m/s<sup>2</sup> ausübt.

Die konventionelle Meter-Wassersäule entspricht dem Druck, den eine 1000 mm lange Wassersäule der Dichte 1 g/cm<sup>3</sup> (bei 4 °C) unter der Normfallbeschleunigung 9,80665 m/s<sup>2</sup> ausübt.

Nach der Norm DIN 1314 "Druck-Grundbegriffe, Einheiten", Ausgabe Februar 1977, gelten folgende Definitionen:

Unter einer Druckdifferenz  $\Delta p$  wird die Differenz zwischen zwei absoluten Drücken verstanden.

$$(1-1) \quad \Delta p = p_1 - p_2$$

Der Überdruck  $p_e$ <sup>1)</sup> ist die Differenz zwischen einem absoluten Druck  $p$  und dem jeweiligen Atmosphärendruck  $p_{amb}$ <sup>2)</sup>,

$$(1-2) \quad p_e = p - p_{amb} = p_{abs} - p_{amb} \quad 3)$$

Der Überdruck  $p_e$  kann positive und negative Werte annehmen.

1) Von excedens = überschreitend

2) Von ambiens = umgebend

3) Zur besseren Unterscheidung wird in dieser Prüfregel neben dem Formelzeichen  $p$  auch das Formelzeichen  $p_{abs}$  für den absoluten Druck verwendet.

Die bisher benutzte Definition des Unterdrucks, die positive Werte für den Fall  $p$  kleiner als  $p_{amb}$  ergab, soll nicht mehr angewandt werden.

## 8.2 BEISPIELE

Alle im folgenden dargestellten Beispiele umfassen jeweils nur einen Meßwert. Systematische Fehler des Prüflings, die in der Größenordnung der Summe der Einstellunsicherheiten von Prüfling und Normal liegen, sind jedoch erst erkennbar, wenn die Ergebnisse mehrerer Messungen nach den in DIN 1319 angegebenen Regeln der Fehlerrechnung analysiert werden. Dabei müssen die Messungen gleichmäßig über den gesamten Meßbereich verteilt werden, damit die Abhängigkeit des Fehlers von der Meßgröße deutlich wird.

Zur Auswertung der Druckmessungen müssen die örtlichen  $g$ -Werte bekannt sein. Sie können erfragt werden beim Deutschen Geodätischen Institut, Marstallplatz 8, 8000 München 22, Ruf 089/228271 (Bayerische Akademie der Wissenschaften).

## 8.2.1 BESTIMMUNG DER STANDKORREKTION EINES BAROMETERS BEI DEM JEWEILIGEN ATMOSPHÄRISCHEN LUFTDRUCK: VERGLEICH EINES STATIONSBAROMETERS MIT EINEM GEFÄSSHEBERBAROMETER

### a) Allgemeines

Die Forderung, daß der Fehler des Normals =  $1/3$  des Fehlers des Prüflings sein soll, läßt sich bei der Barometerprüfung nicht immer streng erfüllen, da nur eine handelsübliche Bauart als Normalbarometer oder als Kontrollbarometer zur Verfügung steht.

Die Forderung, daß die Druckbezugsebenen des Prüflings und des Normal in gleicher Höhe liegen sollen, muß nicht streng erfüllt sein, da der Höhenunterschied der beiden Ebenen von 0,84 m einer Druckdifferenz von nur 0,1 mbar entspricht.

Die beiden Barometer sind mit 10 bis 20 Messungen bei möglichst unterschiedlichen Barometerständen, gegebenenfalls über längere Zeit zu vergleichen.

Beim Normalbarometer (Gefäßheberbarometer) ist das Quecksilber vor der Ablesung mit der Verdrängereinrichtung so anzuheben, daß die Kuppe des Meniskus die Unterkante der Visiereinrichtung berührt (Lichtspaltmethode). Nach der Ablesung ist das Quecksilber so weit abzusenken, daß das Glasrohr im Ablesebereich möglichst lange von Verunreinigungen, die sich auf der Quecksilberoberfläche befinden, frei bleibt.

Wird die Luft im Raum zur Temperierung umgewälzt, so ist diese Anlage vor der Ablesung abzuschalten, damit die Stände des Quecksilbers bei ruhender Luft eingestellt und abgelesen werden können.

Zur Bestimmung der Kapillardepression des Quecksilbers bei in mbar geteilten Skalen ist die abgelesene Kuppenhöhe durch Division mit 1,333 in mm umzuwandeln. Der nunmehr der Tabelle 8 zu entnehmende Wert der Kapillardepression in mmHg gibt nach Multiplikation mit 1,333 den Wert in mbar an.

Die Menge des Quecksilbers ist bei dem Stationsbarometer und bei dem Prüfbarometer so zu bemessen, daß die Kapillardepression, die einer Kuppenhöhe zwischen 0,7 und 0,9 mm entspricht, nicht berücksichtigt wird. Bei anderen Kuppenhöhen ist der Wert der Kapillardepression für diese Kuppenhöhe vermindert um den Wert der Kapillardepression für eine Kuppenhöhe von 0,8 mm zu berücksichtigen. Die Bezugstemperatur der Skalenteilung der Gefäßheberbarometer und der Stationsbarometer ist  $0^{\circ}\text{C}$ .

Beim Fortinbarometer ist die Spitze des Stahlmaßstabes in "optischen Kontakt" mit der Quecksilberoberfläche zu bringen. Nach der Ablesung sollte der Maßstab etwas angehoben werden, damit seine Spitze bei sich änderndem Luftdruck nicht in das Quecksilber eintaucht. Die Stahlskalen der Fortinbarometer sind häufig mit der Bezugstemperatur  $t_B = 20^{\circ}\text{C}$  geteilt. Diese Bezugstemperatur ist auf den Skalenmaßstab aufzubringen, z.B. einzuschlagen.

b) Zahlenwerte

<u>Normal</u>	
Gefäßheberbarometer	
lichte Weite der Schenkel: 14 mm	
Messingmaßstab ( $t_B = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	
Skalenwert: 1 Torr	
Noniusteilung: 0,05 Torr	
Örtliche Fallbeschleunigung: $g = 9,8125\text{ m/s}^2$	
Beobachtungstemperatur: $t = 21,4\text{ }^{\circ}\text{C}$	
Druckbezugsebene des Stationsbarometers $c = 15\text{ mm}$ unter derjenigen des Gefäßheberbarometers: Einfluß auf die Druckmessung vernachlässigbar. Die Drücke werden aus den abgelesenen Werten nach Gleichung 7.2 $\rho_{\text{abs}} = \frac{g}{g_n} \rho_a u_a(t)$ bestimmt. $u_a(t)$ ist Tabelle 6 zu entnehmen: $u_{0,Ms}(21,4) = 0,996534$ .	
Ablesung	$l_a = 741,20\text{ Torr}$
oberer Meniskus:	
Kuppenhöhe 1,4 mm	
Kapillardepr. *) 0,15 mmHg	
unterer Meniskus:	
Kuppenhöhe 1,2 mm	
Kapillardepr. 0,13 mmHg	
zu berücksichtigende Kapillardepr.	+ 0,02 Torr
*) nach Tabelle 8	
korrigierte Ablesung	<u>741,22 Torr</u>
$p = 1,00060 \cdot 741,22 \cdot 0,996534\text{ Torr}$	
	= 739,09 Torr
	= <u><u>985,38 mbar</u></u>

<u>Prüfling</u>	
Stationsbarometer	
lichte Weite des Steigrohres: 8 mm	
Messingmaßstab ( $t_B = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	
Skalenwert: 1 mbar	
Noniusteilung: 0,1 mbar	
Gefäß: Gußeisen $V_0 : A_0 = 26,7\text{ mm}$ (Herstellernummer)	
Gefäßkorrektur: $-a \frac{V_0}{A_0} (\gamma - 3\alpha_1)t$	
(vergl. S. 35); $a = 1,333$ ;	
$\gamma = 181 \cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; $\alpha_1 = 10 \cdot 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	
	$l_a = 988,4\text{ mbar}$
1,1 Skt = 0,8 mm	$\begin{matrix} > 0,7\text{ mm} \\ < 0,9\text{ mm} \end{matrix}$
	$\swarrow$
	0,0 mbar
Gefäßkorrektur:	
= -0,115 mbar	<u>- 0,1 mbar</u>
	988,3 mbar
$p = 1,00060 \cdot 988,3 \cdot 0,996534\text{ mbar}$	
	= <u><u>985,5 mbar</u></u>

Das Stationsbarometer zeigt den Luftdruck um 0,1 mbar zu hoch an.

## 8.2.2 BESTIMMUNG DER FEHLER EINES ÜBERDRUCKMESSGERÄTES MIT QUECKSILBERFÜLLUNG: VERGLEICH EINES GEFÄSSMANOMETERS MIT EINEM GLEICHSCHENKLIGEN U-ROHR-MANOMETER

### a) Allgemeines

Mit dem Gefäßmanometer können wie mit dem U-Rohr-Manometer positive und - durch Vertauschen der Anschlüsse - auch negative Überdrücke gemessen werden. Bei genauen Messungen muß die Kapillardepression des Meniskus im Steigrohr gemäß Tabelle 8 berücksichtigt werden. Durch wiederholte Einstellung des Überdrucks  $p_e = 0$  sind die Streuungen für diesen Meßwert zu ermitteln.

Als Normal ist ein gleichschenkliges U-Rohr mit weiten Schenkeln geeignet. Gelegentlich wird z.B. für industrielle Messungen als Normal ein gleichschenkliges U-Rohr mit Schenkeln der lichten Weite bis 10 mm verwendet. Die Forderung, daß der Fehler des Normals nicht größer als  $1/3$  des Fehlers des Prüflings sein soll, ist dann allerdings nicht erfüllt.

Um bei der Messung Störungen durch Schwankungen des atmosphärischen Luftdrucks zu vermeiden, sind die entsprechenden Schenkel des Normals und des Prüflings vor der Ablesung der Meßwerte miteinander zu verbinden und dadurch von der Atmosphäre zu trennen. Die Meßwerte dürfen erst abgelesen werden, nachdem sich das durch die Einregelung des jeweiligen Überdrucks gestörte Temperaturgleichgewicht wieder eingestellt hat (Wartezeit ca. 5 min).

b) Zahlenwerte

Normal

Gleichschenkliges U-Rohr

lichte Weite der Schenkel: 9 mm

Stahlmaßstab ( $t_B = 20\text{ }^\circ\text{C}$ )

Skalenwert: 1 mm

Noniusteilung: 0,1 mm

Örtliche Fallbeschleunigung:  $g = 9,8074\text{ m/s}^2$

Beobachtungstemperatur:  $t = 22,5\text{ }^\circ\text{C}$

Mittlerer atmosphärischer Luftdruck:  $p_{amb} = 1010,0\text{ mbar}$

Druckmittel: Luft

Druckbezugsebene des Gefäßmanometers  $c = 400\text{ mm}$  unter derjenigen des U-Rohr - Manometers.

Die Drücke werden aus den abgelesenen Längen nach Gleichung 5.2.2. und Gleichung 5.3.2.

bestimmt.  $u_{t_B}$  ist Tabelle 6 zu entnehmen.

$$p_e = g \cdot l_a \cdot \rho_{Hg}(\rho_0, 0^\circ\text{C}) \cdot u_B(t) - g \cdot \frac{1}{2} \cdot l_a \cdot [\rho_0(\rho_{amb} + p_e, t) + \rho_0(\rho_{amb}, t)] + g \cdot c \cdot [\rho_0(\rho_{amb} + p_e, t) - \rho_0(\rho_{amb}, t)]$$

$l_a, c$  in mm;  $g$  in  $\text{m/s}^2$ ;  $\rho$  in  $\text{g/cm}^3$ ;  $p_e$  in Pa

Ablesung 743,8 mm

oberer Meniskus

Kuppenhöhe 1,0 mm

Kapillardepr.\*) 0,43 mm

unterer Meniskus

Kuppenhöhe 0,8 mm

Kapillardepr.\*) 0,35 mm

zu berücksichtigende

Kapillardepr. 0,0 mm

korrigierte Ablesung 743,8 mm

\*) nach Tabelle 8

$$\curvearrowright p_e \approx 991,6\text{ mbar}$$

Bestimmung der Gasdichten  $\rho_G(p_e + p_{amb}, t)$  und  $\rho_G(p_{amb}, t)$ :

$$\rho_G(1010,0\text{ mbar}; 22,5\text{ }^\circ\text{C}) \approx 1,19 \cdot 10^{-3}\text{ g/cm}^3\text{ nach Tabelle 4b.}$$

$$\rho_G(991,6\text{ mbar} + 1010,0\text{ mbar}; 22,5\text{ }^\circ\text{C}) \approx 2,36 \cdot 10^{-3}\text{ g/cm}^3\text{ nach Tabelle 4a.}$$

$$p_e = 9,8074 \cdot 743,8 \cdot 13,5951 \cdot 0,995972\text{ Pa}$$

$$- 9,8074 \cdot 372 \cdot (0,00236 + 0,00119)\text{ Pa}$$

$$+ 9,8074 \cdot 400 \cdot (0,00236 - 0,00119)\text{ Pa}$$

$$= 98764,9\text{ Pa}$$

$$= \underline{\underline{987,65\text{ mbar}}}$$

Prüfling

Gefäßmanometer

lichte Weite des Steigrohres: 6 mm

Messingmaßstab ( $t_B = 20\text{ }^\circ\text{C}$ )

Skalenwert: 1 mbar

Noniusteilung: 0,1 mbar

$$p_e = g \cdot l_a \cdot u_B(t) \cdot \rho_{Hg}(\rho_0, 0^\circ\text{C}) - g \cdot l_a \cdot \rho_0(\rho_{amb}, t)$$

$l_a$  in mm (der in mbar abgelesene Wert ist durch Division mit 1,3332 in mm umzuwandeln und für  $l_a$  einzusetzen).  $g$  in  $\text{m/s}^2$ ;  $\rho$  in  $\text{g/cm}^3$ ;  $p_e$  in Pa.

990,2 mbar

$$1,2\text{ Skt} \hat{=} 0,9\text{ mm}$$

$$1,03\text{ mm} \hat{=} 1,37\text{ mbar}$$

1,4 mbar

991,6 mbar

= 743,76 mm

$$p_e = 9,8074 \cdot 743,76 \cdot 13,5951 \cdot 0,995990 \cdot 13,5951$$

$$- 9,8074 \cdot 744 \cdot 0,00119\text{ Pa}$$

$$= 98761,1\text{ Pa}$$

$$= \underline{\underline{987,61\text{ mbar}}}$$

Das Gefäßmanometer zeigt den mit dem Normal gemessenen Druck im Rahmen der Ablesungsunsicherheit richtig an.

### 8.2.3 BESTIMMUNG DER FEHLER EINES ÜBERDRUCKMESSGERÄTES MIT WASSERFÜLLUNG: VERGLEICH EINES WASSERMINIMETERS MIT EINER TAUCHGLOCKE

#### a) Allgemeines

Das Askania-Minimeter <sup>\*)</sup> mit Wasser als Sperrflüssigkeit ist zur Messung kleiner positiver oder negativer Überdrücke im Bereich 0 bis 14,7 mbar (150 mmWS) geeignet.

Das mit einer Meßspindel verbundene große Gefäß ist zur Messung von Überdrücken und zur Einstellung des Nullpunktes bei  $p_e = 0$  so zu verschieben, daß die im Wasser befindliche Spitze im angeschlossenen kleinen Gefäß unter dem Druck  $p_e$  die Wasseroberfläche fast berührt. Der Abstand Spitze - Spiegelbild kann durch eine besondere Vorrichtung beobachtet werden. Der Stand des beweglichen Gefäßes wird an einer feststehenden Hilfsskala (Skalenwert 1 mm) und an einer Trommelskala (Skalenwert 0,01 mm) abgelesen. Bei weiten Verbindungsleitungen stellt sich das Druckgleichgewicht verhältnismäßig schnell ein. In Räumen konstanter Temperatur kann die Temperatur des Wassers gleich der Lufttemperatur gesetzt werden, wenn sich das Gerät längere Zeit in diesem Raum befand.

Als Normal ist eine Tauchglocke <sup>\*)</sup> geeignet. Als Sperrflüssigkeit ist eine Flüssigkeit mit konstanter, nicht zu großer Oberflächenspannung, z.B. Dekalin, zu verwenden.

---

<sup>\*)</sup> vgl. Abbildungen auf den folgenden Seiten

b) Zahlenwerte

Normal

Tauchglocke (Messing)

$$A_{\text{eff}} = 0,019974 \text{ m}^2$$

Sperrflüssigkeit: Dekalin

Empfindlichkeit:  $\pm 0,25 \text{ Pa}$

Örtliche Fallbeschleunigung:  $g = 9,8074 \text{ m/s}^2$

Beobachtungstemperatur:  $t = 23,2 \text{ }^\circ\text{C}$

Mittlerer atmosphärischer Luftdruck:  $p_{\text{amb}} = 1000 \text{ mbar}$

Druckmittel: Luft

Druckbezugsebene des Wasserminimeters  $c = 200 \text{ mm}$  unter derjenigen der Tauchglocke.

Formeln für die Druckberechnung:

Gleichung 5.6.

$$p_e = g \frac{m}{A_{\text{eff}} \rho_m(t)} \left[ 1 - \frac{0,0012 \text{ g/cm}^3}{\rho_m} \right] + g c [\rho_G(\rho_{\text{amb}} + \rho_e, t) - \rho_G(\rho_{\text{amb}}, t)]$$

$$A_{\text{eff}} = A_0^{20^\circ\text{C}} (1 + 2\alpha_{\text{MS}}(t - 20^\circ\text{C})); (U(p_e) = 1)$$

$$\rho_m = 8,4 \text{ g/cm}^3; \alpha_{\text{MS}} = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Massenaufgabe:

$$m = 2,3451 \text{ kg}; p_e \approx \frac{\text{mg}}{A_0} \approx 11,5 \text{ mbar}$$

$\rho_G(p, t)$  nach Tabelle 4b

$$p_e = \frac{9,8074 \cdot 2,3451}{0,019974 (1 + 36,8 \cdot 10^{-6} \cdot 3,2)} \left[ 1 - \frac{0,0012}{8,4} \right] \text{ Pa} \\ + 9,8074 \cdot 200(0,001190 - 0,001176) \text{ Pa} \\ = \underline{\underline{1151,19 \text{ Pa}}}$$

$g c \Delta \rho_G = 0,03 \text{ Pa}$ : Der Einfluß des Höhenunterschiedes zwischen den Druckbezugsebenen kann hier i.allg. vernachlässigt werden.

Prüfling

Wasserminimeter, Bauart: Askania

Stahlmeßschraube ( $t_B = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Einstellunsicherheit:  $\pm 0,02 \text{ mm}$

Gleichung 5.3.4

$$p_e = g l_0 [1 + \alpha(t - t_0)] \rho_{\text{H}_2\text{O}}(\rho_m, t) - g l_0 \rho_G(\rho_{\text{amb}}, t)$$

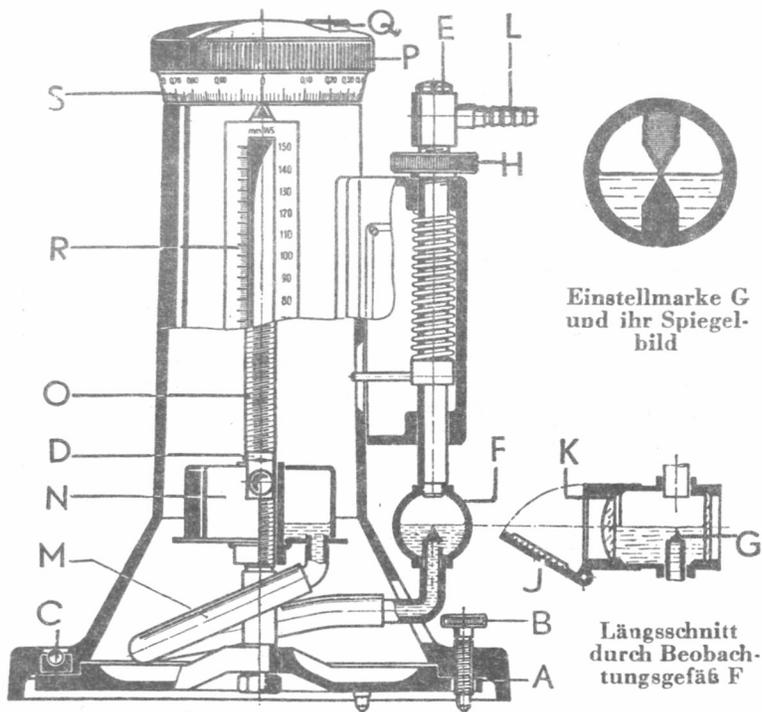
$$\alpha_{\text{St}} = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}. p_m \approx p_0$$

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}(p_0, t)$  nach Tabelle 3 in  $\text{g/cm}^3$

Abgelesene Länge  $l_a = 117,80 \text{ mm}$

$$p_e = 9,8074 \cdot 117,80 \cdot (1 + 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3,2) \cdot 0,997488 \text{ Pa} - \\ - 9,8074 \cdot 117,80 \cdot 0,001176 \text{ Pa} \\ = \underline{\underline{1151,09 \text{ Pa}}} = 117,38 \text{ mmWS}$$

Das Wasserminimeter zeigt den mit dem Normal gemessenen Überdruck innerhalb der Meßunsicherheit richtig an.



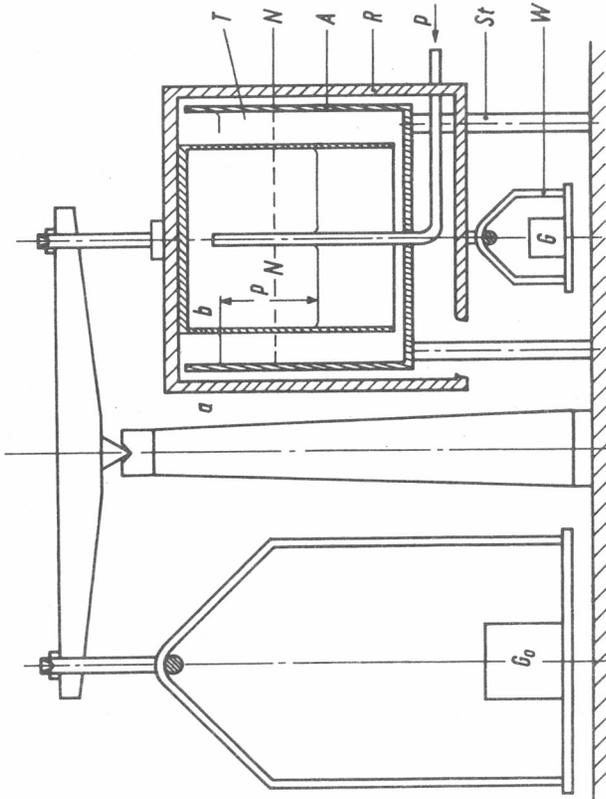
- A = Gehäuse
- B = Fußschrauben
- C = Libelle
- D = Schlauchnippel (-)
- E = Verschlusschraube
- F = Beobachtungsgefäß
- G = Einstellmarke
- H = Kordelmutter
- J = Kippspiegel

- K = Linse
- L = Schlauchnippel (+)
- M = Verbindungsschlauch
- N = Ausgleichsgefäß
- P = Kordelring
- Q = Knopf
- R = Maßstab
- S = Feinteilung

Einstellmarke G  
und ihr Spiegel-  
bild

Längsschnitt  
durch Beobach-  
tungsgefäß F

MIKROMANOMETER BAUART ASKANIA



Schematischer Aufbau eines Tauchlockengerätes

- |              |                         |
|--------------|-------------------------|
| T Tauchlocke | R Waagschalenaufhängung |
| N Nullniveau | St Ständer              |
| A Außengefäß | W Waagschale            |

#### 8.2.4 BESTIMMUNG DES FEHLERS EINES ÜBERDRUCKMESSGERÄTES MIT WASSERFÜLLUNG: VERGLEICH EINES SCHRÄGROHRMANOMETERS MIT EINEM SCHWIMMERMANOMETER NACH BETZ

##### a) Allgemeines

Das Schrägrohrmanometer dient zur Messung kleiner statischer oder langsam veränderlicher positiver oder negativer Überdrücke. Der Meßbereich wird durch Neigen des Steigrohres verkleinert. Der Reduktionsfaktor der Maßstabteilung und die Längenänderung durch die Temperatur werden meistens nicht berücksichtigt.

Als Normal ist das Schwimmermanometer, Bauart Betz, geeignet. Die im Gehäuse des Schwimmermanometers untergebrachte Projektionslampe soll nur zur Ablesung eingeschaltet werden, um Temperaturänderungen des Wassers zu vermeiden.

Mögliche Störungen durch Schwankungen des atmosphärischen Luftdrucks sind durch geeignete Maßnahmen zu beseitigen ("künstliche Atmosphäre", vgl. dazu S. 13).

b) Zahlenwerte

Normal

Schwimmermanometer nach Betz  
 Glasmaßstab ( $t_B = 20\text{ }^\circ\text{C}$ )  
 $\alpha_{GI} = 8,5 \cdot 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$   
 Skalenwert: 1 mm (reduzierte Teilung)  
 Einstellunsicherheit:  $\pm 0,05\text{ mm}$

Prüfling

Schrägröhrmanometer  
 Stahlmaßstab ( $t_B = 20\text{ }^\circ\text{C}$ )  
 $\alpha_{St} = 11,5 \cdot 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$   
 Skalenwert: 1 mm  
 Einstellunsicherheit:  $\pm 0,2\text{ mm}$   
 Meßbereichsfaktor:  $\sin \beta$   
 ( $\beta$  ist der einstellbare Neigungswinkel)

Örtliche Fallbeschleunigung:  $g = 9,8125\text{ m/s}^2$   
 Beobachtungstemperatur:  $t = 22,2\text{ }^\circ\text{C}$   
 Mittlerer atmosphärischer Luftdruck:  $p_{amb} = 1005\text{ mbar}$   
 Druckmittel: Luft

Druckbezugsebene des Schrägröhrmanometers  $c = 50\text{ mm}$  unter derjenigen des Schwimmermanometers.

Die Drücke werden aus den abgelesenen Längen nach Gleichung 5.3.4 berechnet.

$$\rho_e = g l_a [1 \cdot \alpha(t - t_B)] \rho_{H_2O}(\rho_m, t) - g l_a \rho_G(\rho_{amb}, t) + g c [\rho_G(\rho_{amb}, \rho_e, t) - \rho_G(\rho_{amb}, t)]$$

$$\rho_e = [g l_a [1 \cdot \alpha(t - t_B)] \rho_{H_2O}(\rho_m, t) - g l_a \rho_G(\rho_{amb}, t)] \sin \beta$$

$$\beta = 30^\circ; \sin \beta = 0,5$$

$\rho_{H_2O}(p_0, t)$  nach Tabelle 3;  $\rho_G(p_{amb}, t)$  nach Tabelle 4b.

Abgelesene Länge  $l_a = 50,25\text{ mm}$

$$p_e = 9,8125 \cdot 50,25 \cdot (1 + 8,5 \cdot 10^{-6} \cdot 2,2) \cdot 0,997722\text{ Pa}$$

$$- 9,8125 \cdot 50,25 \cdot 0,001186\text{ Pa}$$

$$+ (0)$$

$$= \underline{\underline{491,38\text{ Pa}}}$$

Abgelesene Länge  $l_a = 100,5\text{ mm}$

$$p_e = 9,8125 \cdot 100,5 \cdot 0,5 (1 + 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 2,2) \cdot 0,997722\text{ Pa}$$

$$- 9,8125 \cdot 100,5 \cdot 0,5 \cdot 0,001186\text{ Pa}$$

$$= \underline{\underline{491,38\text{ Pa}}} = 50,1\text{ mmWS}$$

Das Schrägröhrmanometer zeigt den mit dem Normal gemessenen Überdruck innerhalb der Meßunsicherheit richtig an.

## 8.2.5 BESTIMMUNG DER FEHLER DER GERÄTE ZUR MESSUNG VON DRUCKDIFFERENZEN

### a) Allgemeine Hinweise

Wenn keine Anlage zur Messung einer Druckdifferenz bei höherem statischen Druck zur Verfügung steht, so sind zunächst die Fehler des Gerätes durch Vergleich mit einem Überdruckmeßgerät zu bestimmen mit dem atmosphärischen Luftdruck als Bezugsdruck. Zusätzlich ist eine Funktionsprüfung bei höheren statischen Drücken und dem Differenzdruck  $\Delta p = 0$  auszuführen. Der Stand der Sperrflüssigkeit muß beim Differenzdruck  $\Delta p = 0$  und allen statischen Drücken ablesbar oder der Nullpunkt einstellbar sein. Bei bekannter Änderung der Dichte der Sperrflüssigkeit, des Nullpunktes und ggf. des Maßstabes unter dem statischen Druck können diese Effekte rechnerisch berücksichtigt und die zu erwartenden Fehler des Differenzdruckmeßgerätes unter dem jeweiligen statischen Druck näherungsweise angegeben werden.

### b) Beispiel: Vergleich eines Schwimmermanometers mit einem gleichschenkligen U-Rohr-Manometer

Das Schwimmermanometer, Bauart Schiltknecht, ist zur Messung positiver und negativer Überdrücke bei statischen Drücken bis 150 bar geeignet. Die mit dem Schwimmer verbundene Skala ist durch ein druckfestes Fenstersystem abzulesen.

Die im Gehäuse untergebrachte Projektionslampe erwärmt das Innere des Meßgerätes während der Messung. Da die Temperaturverteilung in der Sperrflüssigkeit nicht bestimmt werden kann, wird die Unsicherheit in der Dichte der Flüssigkeit durch einen erhöhten Wert der Meßunsicherheit berücksichtigt und bei der Auswertung der Druckmessungen die Temperatur der Sperrflüssigkeit mit der Raumtemperatur gleichgesetzt.

Als Normal sind geeignet:

- 1) Gleichschenklige U-Rohre, bei denen die Lage der Menisken mit magnetischen oder induktiven Meßmethoden ermittelt wird.
- 2) Gleichschenklige U-Rohre mit zwei weiten Gefäßen mit Fenstern und Meßspitzen, deren Abstand von ihren Spiegelbildern mit Hilfe eines Nivelliergerätes mit Planplattenmikrometer bestimmt und auf einen Maßstab übertragen werden kann.

Zur Vermeidung von Druckänderungen, die durch Temperaturänderungen beim Entspannen komprimierter Gase entstehen, reduziert man das einem Kompressor oder einer Stahlflasche entnommene Gas auf einen Druck, der etwas größer ist als der gewünschte Überdruck  $p_{e,1}$  und hält es zum Temperatúrausgleich genügend lange Zeit in einem Puffervolumen. Anschließend wird die Apparatur auf den Überdruck  $p_{e,2}$  gebracht und die Lage der Menisken des U-Rohres beim Differenzdruck  $\Delta p = 0$  bestimmt oder die Skala des Schwimmermanometers auf den Nullwert eingestellt. Danach wird die zu messende Druckdifferenz eingestellt.

c) Zahlenwerte

<u>Normal</u>	<u>Prüfling</u>
Gleichschenkliges U-Rohr	Schwimmermanometer, Bauart: Schiltknecht
Sperrflüssigkeit: Wasser	Sperrflüssigkeit: Wasser
Stahlmaßstab ( $t_B = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ) $\alpha_{St} = 11,5 \cdot 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Glasmaßstab ( $t_B = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ) $\alpha_{Gl} = 8,5 \cdot 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Skalenwert: 1 mm	Skalenwert: 2 mm
Einstellunsicherheit: $\pm 0,05\text{ mm}$	Einstellunsicherheit: $\pm 0,1\text{ mm}$
Zulässiger statischer Überdruck: 150 bar	Zulässiger statischer Überdruck: 150 bar
Örtliche Fallbeschleunigung: $g = 9,8125\text{ m/s}^2$	
Beobachtungstemperatur: $t = 23,3\text{ }^\circ\text{C}$	Barometerstand: $p_{amb} = 1000\text{ mbar}$
Druckmittel: Luft	Statischer Überdruck $p_{e,2} = 80\text{ bar}$
Druckbezugsebene des Schwimmermanometers $c = 50\text{ mm}$ unter derjenigen des Normals. Die Druckdifferenzen werden aus den Anzeigen der beiden Geräte nach Gleichung 5.2.5. berechnet. $\Delta p = p_{e,1} - p_{e,2} = p_{abs,1} - p_{abs,2}$ .	

$$p = g l_a [1 + \alpha(t - 20\text{ }^\circ\text{C})] \rho_{H_2O}(p_o, t) \cdot [1 + 47 \cdot 10^{-6}\text{ bar}^{-1} \cdot p_{e,2}] - g \frac{L_a}{2} \left[ \rho_G(p_{abs,1}, t) + \rho_G(p_{abs,2}, t) \right] + g c \left[ \rho_G(p_{abs,1}, t) - \rho_G(p_{abs,2}, t) \right]$$

Der Einfluß der Kompressibilität des Glasmaßstabes ist vernachlässigt.

Abgelesene Länge:  $l_a = 750,3\text{ mm}$

Abgelesene Länge:  $l_a = 750,5\text{ mm}$

$p_{abs,1} \approx p_{abs,2} + (l_a/10197\text{ mm})\text{bar} \approx p_{e,2} + p_{amb} + (750/10197)\text{bar} \approx 81,07\text{ bar}$ .

Nach Tabelle 4a und Gleichung (2-5) erhält man für die Gasdichten  $\rho_G$ :

$$\rho_G(p_{abs,1}, 23,3\text{ }^\circ\text{C}) = \rho_L(70\text{ bar}, 20\text{ }^\circ\text{C}) \cdot \frac{81,07}{70} \cdot \frac{293,15}{296,45} = 0,09654\text{ g/cm}^3$$

$$\rho_G(p_{abs,2}, 23,3\text{ }^\circ\text{C}) = \rho_L(70\text{ bar}, 20\text{ }^\circ\text{C}) \cdot \frac{81,00}{70} \cdot \frac{293,15}{296,45} = 0,09646\text{ g/cm}^3$$

$$\rho_G = \rho_G(p_{abs,1}, t) - \rho_G(p_{abs,2}, t) \approx 1 \cdot 10^{-4}\text{ g/cm}^3. \text{ Damit wird } g c \Delta \rho_G \approx 5 \cdot 10^{-2}\text{ Pa}.$$

Der Einfluß des Höhenunterschiedes der Druckbezugsebene ist danach vernachlässigbar.

$$\rho_G(p_{abs,1}, t) + \rho_G(p_{abs,2}, t) = 0,1930\text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{H_2O}(t) \cdot (1 + 47 \cdot 10^{-6} \cdot 80) = 0,997463\text{ g/cm}^3 \cdot 1,003760 = 1,001213\text{ g/cm}^3$$

( $\rho_{H_2O}(p_o, t)$  nach Tabelle 3).

Damit erhält man für die Druckdifferenzen:

$$\begin{aligned} (\Delta p)_N &= 9,8125 \cdot 750,3 \cdot (1 + 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3,3) \cdot 1,001213\text{ Pa} - \\ &- 9,8125 \cdot 0,5 \cdot 750,3 \cdot 0,1930\text{ Pa} + (0) \\ &= \underline{\underline{6661,1\text{ Pa}}} = 679,25\text{ mmWS} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\Delta p)_{Pr} &= 9,8125 \cdot 750,5 \cdot (1 + 8,5 \cdot 10^{-6} \cdot 3,3) \cdot \\ &\cdot 1,001213\text{ Pa} - \\ &- 9,8125 \cdot 0,5 \cdot 750,5 \cdot 0,1930\text{ Pa} \\ &= \underline{\underline{6662,9\text{ Pa}}} = 679,42\text{ mmWS} \end{aligned}$$

Das Schwimmermanometer zeigt beim statischen Überdruck von 80 bar die mit dem Normal gemessene Druckdifferenz im Rahmen der Meßunsicherheit richtig an.

# Physikalisch-Technische Bundesanstalt



## Prüfungsschein

Gegenstand: Flüssigkeitsmanometer mit Schwimmer und Wasserfüllung

Hersteller: E. Schiltknecht Ing.sia, Gossau/Schweiz

Hersteller-(Fabrik-) Nummer:

Antragsteller:

Gesch.-Nr.: PTB

Amtliches Zeichen:

Das Flüssigkeitsmanometer in der Form eines U-Rohr-Manometers dient zur Messung von Gasdruckdifferenzen im Meßbereich von 0 mbar bis 98 mbar bei statischen Überdrücken von 0 bar bis 150 bar.

Die Skala des an einem Schwimmer befestigten Maßstabes zeigt den Höhenunterschied zwischen den beiden Flüssigkeitsoberflächen an. Der Skalenwert beträgt 2 mm. Eine Noniusskala, auf die der Meßstab projiziert wird, ermöglicht die Ablesung bis auf  $\pm 0,1$  mm.

Die Beleuchtungseinrichtung erwärmt das Innere des Meßgerätes und damit die Sperrflüssigkeit, deren Temperatur nicht bestimmt werden kann. Wenn die Lampe ca. 3 Stunden vor Beginn der Messung eingeschaltet wird, bildet sich eine stationäre Temperaturverteilung aus. Die mitgeteilten Meßwerte beziehen sich auf diesen Zustand.

Bei der Auswertung der Druckmessungen wurde die Temperatur des Wassers der Raumtemperatur gleichgesetzt. Der dadurch hervorgerufene systematische Fehler der Druckmessung mit dem Flüssigkeitsmanometer ist in den mitgeteilten Meßwerten enthalten, die außerdem durch die nicht bestimmbare Unsicherheit des Gleichgewichtswertes der Temperatur der Sperrflüssigkeit mit einer um 0,02 % vom Meßwert erhöhten Meßunsicherheit behaftet sind.

...

Prüfungsscheine ohne Unterschrift und ohne Dienststempel haben keine Gültigkeit.

Die Prüfungsscheine dürfen nur unverändert weiterverbreitet werden.

Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Bundesallee 100, Postfach 3345, D-3300 Braunschweig.

Die Druckdifferenz  $\Delta p$  der Flüssigkeitssäule auf der Messzugesebene, gekennzeichnet durch die Lage des Meniskus bei  $p = 0$ , berechnet sich in Pa nach der Gleichung

$$\Delta p = g A [1 + \alpha(t - 20^\circ\text{C})] (1 + \alpha p_{e,2}) \rho_{H_2O}(t) - g [\rho_G(p_1, t) + \rho_G(p_2, t)] \frac{A}{2}$$

- g örtliche Fallbeschleunigung (m/s<sup>2</sup>)  
 A Ablesung (mm)  
 $\alpha = 8 \cdot 10^{-6}$  Längenausdehnungskoeffizient des Maßstabes (K<sup>-1</sup>)  
 t Temperatur des Maßstabes und der Wassersäule (°C)  
 $\alpha = 47 \cdot 10^{-6}$  Volumenkompressibilität des Wassers (bar<sup>-1</sup>)  
 $\rho_{H_2O}(t)$  Dichte des Wassers bei Atmosphärendruck und der Temperatur t nach Tab.1 der Anlage zum Prüfungsschein (g/cm<sup>3</sup>)  
 $\rho_G(p, t)$  Dichte des bei der Messung benutzten Gases bei absolutem Druck p und der Temperatur t. Werte für Stickstoff nach Tab.2 der Anlage zum Prüfungsschein in Verbindung mit der dort angegebenen Interpolationsformel (g/cm<sup>3</sup>)

Zur Berechnung der Meßwerte in mbar gilt: 1 mbar = 100 Pa

Das Flüssigkeitsmanometer wurde bei Atmosphärendruck und bei einem statischen Druck von 80 bar geprüft.

### 1) Ergebnisse der Prüfung bei Atmosphärendruck

Tabelle 1

Überdruck (Normalgerät)	Aus der Anzeige des Prüflings berechneter Überdruck	
	Vorwärtsgang	Rückwärtsgang
22,93 mbar	22,88 mbar	
32,50 "	32,45 "	32,46 mbar
42,49 "	42,43 "	
52,44 "	52,35 "	52,37 "
57,44 "	57,35 "	
67,43 "	67,32 "	67,34 "
77,39 "	77,28 "	
87,32 "	87,20 "	87,21 "
97,31 "	97,17 "	

Meßunsicherheit  $U_N = \pm 0,02$  mbar

Meßunsicherheit  $U = \pm (0,01 \text{ mbar} + 0,0002 \cdot p_e)$

### 2) Ergebnis der Prüfung bei einem statischen Überdruck von 80 bar unter Berücksichtigung der aus Tab.1 hervorgehenden Anzeigefehler:

Ein möglicher, vom statischen Druck abhängender systematischer Fehler der Differenzdruckmessung mit dem Flüssigkeitsmanometer ist kleiner oder höchstens gleich  $0,02 \text{ mbar} + 0,0002 \cdot \Delta p$ . Diese Grenze ist durch die Meßunsicherheit des bei der Prüfung verwendeten Normalgerätes gegeben.

Zur Kennzeichnung der vollzogenen Prüfung ist am Gehäuse des Flüssigkeitsmanometers eine Klebmarke mit dem Zeichen ..... angebracht worden.

Anlage zum Prüfungsschein ...

Tabelle 1

Dichte  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}(t)$  des Wassers in  $\text{g}/\text{cm}^3$  im Temperaturbereich  $0^\circ\text{C}$  bis  $40^\circ\text{C}$  beim absoluten Druck  $p_0 = 1,01325 \text{ bar}$

$^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,999840	0,999899	0,999940	0,999964	0,999972	0,999964	0,999940	0,999901	0,999848	0,999780
10	0,999699	0,999604	0,999496	0,999376	0,999243	0,999098	0,998941	0,998773	0,998593	0,998403
20	0,998202	0,997990	0,997768	0,997536	0,997294	0,997043	0,996782	0,996511	0,996232	0,995943
30	0,995645	0,995339	0,995024	0,994701	0,994369	0,994030	0,993682	0,993326	0,992963	0,992592
40	0,992214									

Tabelle 2

Dichte  $\rho_{\text{N}_2}(p, t) \cdot 10^3$  des Stickstoffs in  $\text{g}/\text{cm}^3$  im Temperaturbereich  $0^\circ\text{C}$  bis  $40^\circ\text{C}$  und Druckbereich 1 bar bis 150 bar

$^\circ\text{C}$	1 bar	4 bar	7 bar	10 bar	40 bar	70 bar	100 bar	150 bar
0	1,2340	4,9427	8,6608	12,388	50,024	87,881	125,26	185,71
10	1,1903	4,7660	8,3483	11,937	48,052	84,199	119,79	176,42
20	1,1496	4,6016	8,0580	11,518	46,244	80,854	114,85	168,96
30	1,1116	4,4483	7,7676	11,129	44,579	77,798	110,37	162,20
40	1,0760	4,3050	7,5350	10,766	43,038	74,992	106,27	156,0E

$$\rho_{\text{N}_2}(p, t) = \rho_{\text{N}_2}(p_{\text{Tab}}, t_{\text{Tab}}) \cdot (p \cdot T_{\text{Tab}} / p_{\text{Tab}} \cdot T); \quad T = 273,15 + t$$

<https://doi.org/10.7795/510.202007161>

9 TABELLEN UND ABBILDUNGEN

TABELLE 2

Dichte  $\rho_{\text{Hg}}$  (t) des Quecksilbers in  $\text{g/cm}^3$  im Temperaturbereich 0 °C bis 40 °C beim absoluten Druck  $p_0 = 1,01325 \text{ bar}$

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	13,59508	13,59261	13,59015	13,58768	13,58522	13,58275	13,58029	13,57782	13,57536	13,57290
10	13,57044	13,56798	13,56552	13,56306	13,56060	13,55814	13,55569	13,55323	13,55078	13,54832
20	13,54587	13,54341	13,54096	13,53851	13,53606	13,53361	13,53116	13,52871	13,52626	13,52381
30	13,52136	13,51892	13,51647	13,51402	13,51158	13,50913	13,50669	13,50425	13,50181	13,49937
40	13,49692									

$\rho_{\text{Hg}}$  (t) ist mit einer für alle Anwendungen ausreichenden Genauigkeit durch die Beziehung

$$\rho_{\text{Hg}}(t) = 13,5951 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} (1 - 1,81 \cdot 10^{-4} \text{ °C}^{-1} \cdot t) \text{ gegeben.}$$



TABELLE 4A

Dichte  $\rho_L(p, t) \cdot 10^3$  der Luft in  $\text{g/cm}^3$  im Temperaturbereich  $0^\circ\text{C}$  bis  $40^\circ\text{C}$  und Druckbereich 1 bar bis 150 bar

$^\circ\text{C}$	1 bar	4 bar	7 bar	10 bar	40 bar	70 bar	100 bar	150 bar
0	1,276	5,114	8,966	12,83	51,98	91,73	131,36	195,15
10	1,231	4,930	8,642	12,36	49,92	87,83	125,49	186,07
20	1,189	4,761	8,341	11,93	48,03	84,30	120,21	177,94
30	1,150	4,602	8,061	11,52	46,29	81,07	115,42	170,62
40	1,113	4,453	7,798	11,15	44,68	78,11	111,06	163,97

$$\rho_L(p, t) = \rho_L(p_{\text{Tab}}, t_{\text{Tab}}) \cdot (p_{\text{Tab}}/p)^{1,4} \cdot (T/273,15)^{1,4}$$

TABELLE 4B

Dichte trockener Luft in g/cm<sup>3</sup> im Temperaturbereich 10 °C bis 30 °C  
bei absoluten Drücken zwischen 930 mbar und 1040 mbar

$$\rho_L(p, t) \cdot 10^3$$

°C	930	940	950	960	970	980	990	1000	1010	1020	1030	1040
10	1,145	1,157	1,169	1,182	1,194	1,206	1,219	1,231	1,243	1,256	1,268	1,280
11	1,141	1,153	1,165	1,178	1,190	1,202	1,214	1,227	1,239	1,251	1,263	1,276
12	1,137	1,149	1,161	1,173	1,186	1,198	1,210	1,222	1,235	1,247	1,259	1,271
13	1,133	1,145	1,157	1,169	1,182	1,194	1,206	1,218	1,230	1,243	1,255	1,267
14	1,129	1,141	1,153	1,165	1,177	1,190	1,202	1,214	1,226	1,238	1,250	1,262
15	1,125	1,137	1,149	1,161	1,173	1,185	1,197	1,210	1,222	1,234	1,246	1,258
16	1,121	1,133	1,145	1,157	1,169	1,181	1,193	1,205	1,217	1,230	1,242	1,254
17	1,117	1,129	1,141	1,153	1,165	1,177	1,189	1,201	1,213	1,225	1,237	1,249
18	1,113	1,125	1,137	1,149	1,161	1,173	1,185	1,197	1,209	1,221	1,233	1,245
19	1,109	1,121	1,133	1,145	1,157	1,169	1,181	1,193	1,205	1,217	1,229	1,241
20	1,106	1,118	1,129	1,141	1,153	1,165	1,177	1,189	1,201	1,213	1,225	1,236
21	1,102	1,114	1,126	1,137	1,149	1,161	1,173	1,185	1,197	1,208	1,220	1,232
22	1,098	1,110	1,122	1,134	1,145	1,157	1,169	1,181	1,193	1,204	1,216	1,228
23	1,094	1,106	1,118	1,130	1,141	1,153	1,165	1,177	1,189	1,200	1,212	1,224
24	1,091	1,102	1,114	1,126	1,138	1,149	1,161	1,173	1,185	1,196	1,208	1,220
25	1,087	1,099	1,111	1,122	1,134	1,145	1,157	1,169	1,181	1,192	1,204	1,216
26	1,083	1,095	1,107	1,118	1,130	1,142	1,153	1,165	1,177	1,188	1,200	1,212
27	1,080	1,091	1,103	1,115	1,126	1,138	1,150	1,161	1,173	1,184	1,196	1,208
28	1,076	1,088	1,099	1,111	1,122	1,134	1,146	1,157	1,169	1,180	1,192	1,204
29	1,073	1,084	1,096	1,107	1,119	1,130	1,142	1,153	1,165	1,176	1,188	1,200
30	1,069	1,081	1,092	1,104	1,115	1,126	1,138	1,150	1,161	1,172	1,184	1,196

TABELLE 5

Dichte  $\rho_{N_2}(p, t) \cdot 10^3$  des Stickstoffs in  $g/cm^3$  im Temperaturbereich 0 °C bis 40 °C und Druckbereich 1 bar bis 150 bar

°C	1 bar	4 bar	7 bar	10 bar	40 bar	70 bar	100 bar	150 bar
0	1,2340	4,9427	8,6608	12,388	50,024	87,881	125,26	185,71
10	1,1903	4,7660	8,3483	11,937	48,052	84,199	119,79	176,42
20	1,1496	4,6016	8,0580	11,518	46,244	80,854	114,85	168,96
30	1,1116	4,4483	7,7676	11,129	44,579	77,798	110,37	162,20
40	1,0760	4,3050	7,5350	10,766	43,038	74,992	106,27	156,05

$$\rho_{N_2}(p, t) = \rho_{N_2}(p_{Tab}, t_{Tab}) \cdot (p_{Tab}/p_{Tab})^T; \quad T = 273,15 + t$$

$$U_{t_B}(t) = 1 - \frac{\gamma \cdot t - \alpha(t-t_B)}{1 + \gamma \cdot t}$$

Messing	$\gamma = 181,0 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Stahl	$\alpha = 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Stahl	$\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Glas	$\alpha = 8,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$t_B = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

$t_B = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

$t \text{ in } ^\circ\text{C}$	$t_B = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$			$t_B = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$		
	Messing $U_{20^\circ\text{C},\text{Ms}}$	Stahl $U_{20^\circ\text{C},\text{St}}$	Glas $U_{20^\circ\text{C},\text{Gl}}$	Messing $U_{0^\circ\text{C},\text{Ms}}$	Stahl $U_{0^\circ\text{C},\text{St}}$	Glas $U_{0^\circ\text{C},\text{Gl}}$
15,0	0,997	201	0,997	235	0,997	250
15,2		168		201		216
15,4		136		168		181
15,6		104		134		147
15,8		071		100		113
16,0		039		066		078
16,2		007		033		044
16,4	0,996	974	0,996	999		010
16,6		942		966	0,996	976
16,8		910		932		941
17,0		877		898		907
17,2		845		864		873
17,4		813		831		838
17,6		780		797		804
17,8		748		763		770
18,0		716		730		736
18,2		684		696		701
18,4		651		662		667
18,6		619		629		633
18,8		587		595		599
19,0		554		561		564
19,2		522		528		530
19,4		490		494		496
19,6		458		460		462
19,8		425		427		427
20,0		393		393		393
20,2		361		359		359
20,4		329		326		325
20,6		296		292		290
20,8		264		258		256
21,0		232		225		222
21,2		199		191		188
21,4		167		158		153
21,6		135		124		119
21,8		103		090		085
22,0		070		057		051
22,2		038		023		017
22,4		006		000		000
22,6	0,995	974	0,995	989	0,995	982
22,8		941		956		948
23,0		909		922		914
23,2		877		889		880
23,4		845		855		845
23,6		812		821		811
23,8		780		789		777
24,0		748		754		743
24,2		716		721		709
24,4		684		687		674
24,6		651		653		640
24,8		619		620		606
25,0		587		586		572
				553		538
					0,995	986
						953
						782
						420
						385
						351
						317
						282
						248
						214
						179
						145
						111
						076
						042
						008
					0,996	974
						939
						905
						871
						837
						802
						768
						734
						699
						665
						631
						597
						562
						528
						494
						460
						425
						391
						357
						323
						289
						254
						220
						186
						152
						117
						083
						049
						015
						981
						946
						912
						878
						844
						810
						775
						741
						707

$$\alpha_{Ms} = 18,4 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_{St} = 11,5 \cdot 10^{-6}$$

$$\alpha_{G1} = 8,5 \cdot 10^{-6}$$

$$U = [1 + \alpha(t - 20)] \cdot [\rho_{H_2O}(t)/1]$$

t in °C;  $\rho_{H_2O}(t)$  in  $\frac{g}{cm^3}$

t	$\rho_{H_2O}(t)$	Messung U	Stahl U	Glas U
15,0	0,999 097 7	0,999 01	0,999 04	0,999 06
15,2	067 3	0,998 98	01	03
15,4	036 4	95	0,998 98	0,999 00
15,6	005 1	92	95	0,993 97
15,8	0,998 973 3	90	93	94
16,0	941 0	87	90	91
16,2	908 3	84	86	88
16,4	875 1	81	83	84
16,6	841 4	78	80	81
16,8	807 3	75	77	78
17,0	772 8	72	74	75
17,2	737 8	69	71	71
17,4	702 3	65	67	63
17,6	666 5	62	64	65
17,8	630 1	59	61	61
18,0	593 4	56	57	58
18,2	556 2	52	54	54
18,4	518 5	49	50	50
18,6	480 4	45	46	47
18,8	441 9	42	43	43
19,0	403 0	39	39	40
19,2	363 6	35	35	36
19,4	323 8	31	32	32
19,6	283 6	28	28	28
19,8	242 9	24	24	24
20,0	201 9	20	20	20
20,2	160 4	16	16	16
20,4	118 5	13	12	12
20,6	076 1	09	08	08
20,8	033 4	05	04	04
21,0	0,997 990 2	01	0,998 00	0,998 00
21,2	946 7	0,997 97	0,997 96	0,997 96
21,4	902 7	93	92	91
21,6	858 3	89	88	87
21,8	813 5	85	83	83
22,0	768 3	81	79	79
22,2	722 7	76	75	74
22,4	676 7	72	70	70
22,6	630 3	68	66	65
22,8	583 5	64	62	61
23,0	536 3	59	57	56
23,2	488 7	55	53	52
23,4	440 8	50	48	47
23,6	392 4	46	43	42
23,8	343 6	41	39	38
24,0	294 4	37	34	33
24,2	244 9	32	29	28
24,4	195 0	28	25	23
24,6	144 6	23	20	18
24,8	093 9	18	15	13
25,0	042 9	13	10	09

TABELLE 8

Kapillardepression des Quecksilbers in mm  
 Die Kapillardepression in Millibar erhält man durch Multiplikation der Zahlenwerte mit 1,3332

Rohrdurchmesser in mm	Kuppenhöhe in mm										
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	
	bei einer Oberflächenspannung = 0,45 N/m										
6	0,254	0,500	0,729	0,937	1,117	1,266	1,384	1,470			
7	0,176	0,348	0,510	0,661	0,794	0,910	1,006	1,082	1,137		
8	0,126	0,250	0,368	0,478	0,579	0,668	0,744	0,807	0,855	0,890	
9	0,093	0,183	0,271	0,353	0,429	0,498	0,557	0,608	0,649	0,679	
10	0,069	0,137	0,202	0,264	0,322	0,375	0,422	0,462	0,495	0,522	
11	0,052	0,104	0,153	0,200	0,245	0,285	0,322	0,354	0,380	0,402	
12	0,040	0,079	0,117	0,153	0,187	0,218	0,247	0,270	0,293	0,311	
13	0,030	0,060	0,089	0,117	0,144	0,168	0,190	0,210	0,227	0,241	
14	0,023	0,046	0,069	0,090	0,111	0,130	0,147	0,163	0,176	0,187	
15	0,018	0,036	0,053	0,070	0,086	0,101	0,114	0,126	0,137	0,146	
16	0,014	0,028	0,041	0,054	0,067	0,078	0,089	0,098	0,106	0,113	
17	0,011	0,022	0,032	0,042	0,052	0,061	0,069	0,076	0,083	0,088	
18	0,008	0,017	0,025	0,033	0,040	0,047	0,054	0,059	0,064	0,069	
19	0,006	0,013	0,019	0,026	0,031	0,037	0,042	0,046	0,050	0,054	
20	0,005	0,010	0,015	0,020	0,024	0,029	0,032	0,036	0,039	0,042	
21	0,004	0,008	0,012	0,015	0,019	0,022	0,025	0,028	0,030	0,032	
22	0,003	0,006	0,009	0,012	0,015	0,017	0,020	0,022	0,024	0,025	

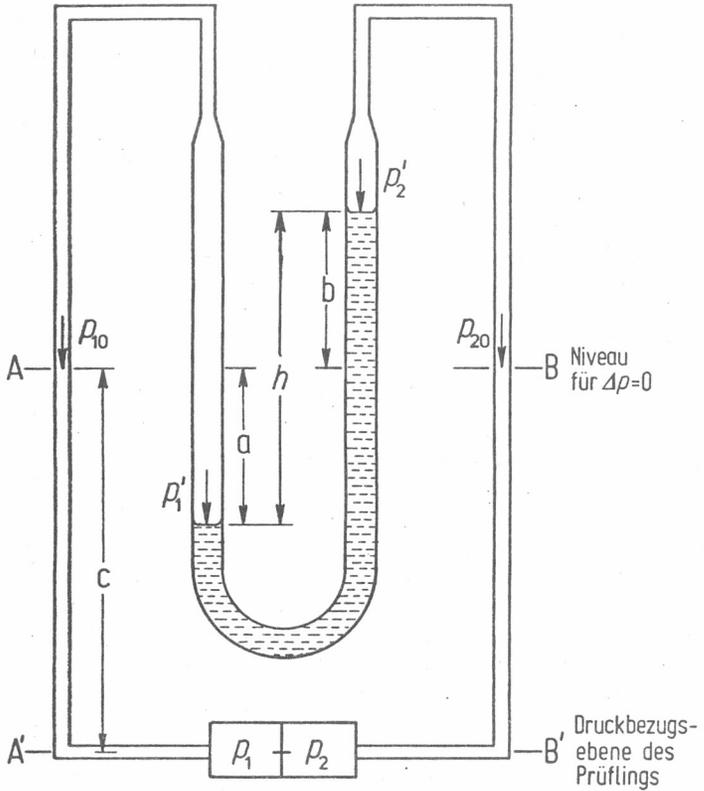


ABB. 1

U-ROHR - MANOMETER

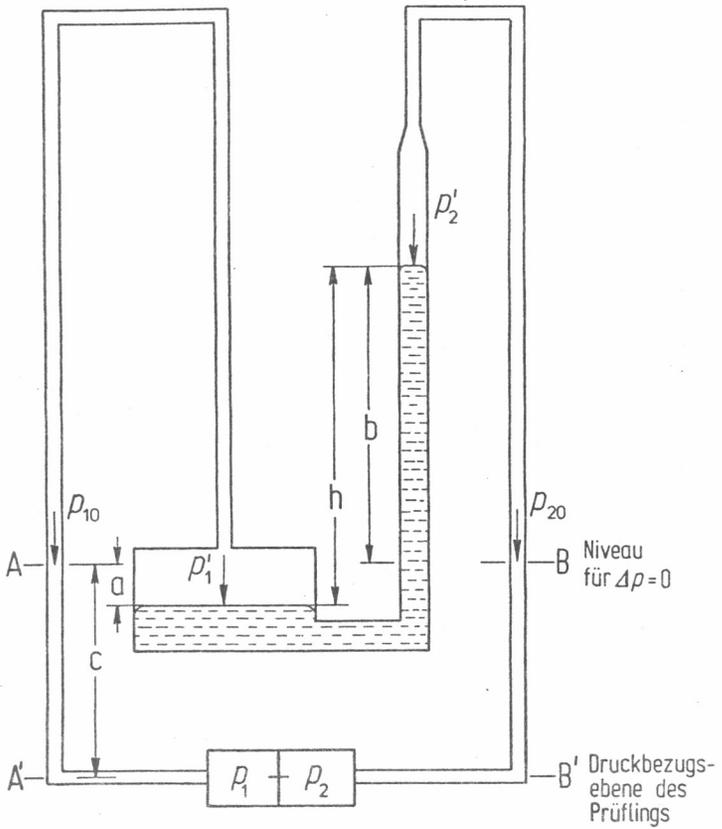


ABB. 2

GEFÄSSMANOMETER

