

**Universität Duisburg-Essen
Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Maschinenbau, IVG, Thermodynamik
Dr. M. A. Siddiqi**

**3. Semester
WS 2012**

**GRUNDLAGENPRAKTIKUM
THERMODYNAMIK**

Versuche zur Druckmessung²

Versuche zur Druckmessung2

Einleitung

Der Druck ist, wie die Temperatur, eine Zustandsgröße und dient zur Beschreibung eines thermodynamischen Systems. Er ist definiert als der Grenzwert des Ausdrucks

$$p = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{F}{A}$$

also als das Verhältnis der Kraft F senkrecht auf eine Fläche A im Grenzübergang 0. Der Druck wird in Kraft pro Flächeneinheit gemessen. Zahlreiche Einheiten stehen nebeneinander im Gebrauch. Bild 1.1 gibt eine Übersicht über einige deutsche und angelsächsische Einheiten und deren Umrechnungsfaktoren. Die im MKS-System gebräuchliche Einheit ist das Pascal. Ein Pascal ist jener Druck, den eine Kraft von 1 Newton auf eine senkrecht zur Kraft stehende Fläche der Größe 1 m^2 ausübt, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$.

Die Kenntnis des Druckes ist für zahlreiche Probleme der Wissenschaft und Technik von Bedeutung. In den im Text beschriebenen drei Versuchen sollen deshalb einige wichtige Druckmessverfahren vorgestellt werden. Bei der Durchführung der beschriebenen Versuche sollen Grundkenntnisse im Umgang mit diesen Messgeräten und über deren Eigenschaften (Genauigkeit, Messgrenzen) und des Einsatzbereiches vermittelt werden.

Die Zurzeit erreichbaren Drücke reichen von etwa 10^{-15} bar bis zu einigen 10^5 bar. Die Bereiche am unteren und oberen Ende der Druckskala sind von Interesse in der Forschung, während der Druckbereich von etwa 10^{-9} bis $5 \cdot 10^3$ bar technische Anwendung findet (Fernsehröhre $p \sim 10^{-9}$ bar, Haber-Bosch-Verfahren $p \sim 350$ bar, Kunststoffindustrie bis $p \sim 5 \cdot 10^3$ bar). Auch in der Natur treten sehr unterschiedliche Drücke auf. Der Druck im Erdmittelpunkt wird auf $3 \cdot 10^6$ bar geschätzt. In der größten Meerestiefe ist der Druck etwa 10^3 bar und in der Atmosphäre in 50 km Höhe etwa 10^{-3} bar.

	N/m ²	at	atm	Torr	kp/m ²	Bar
1 N/m ² = 1 Pa	1	$1,0197 \cdot 10^{-5}$	$9,869 \cdot 10^{-6}$	$7,5006 \cdot 10^{-3}$	0,10197	$1,0 \cdot 10^{-5}$
1 kp/cm ² = 1 at	$9,807 \cdot 10^4$	1	0,9678	$7,3556 \cdot 10^2$	10^4	0,9807
1 atm = 760 Torr	$1,013 \cdot 10^5$	1,033	1	760	$1,0332 \cdot 10^4$	1,0133
1 Torr = 1 mm QS	$1,33 \cdot 10^2$	$1,3595 \cdot 10^{-3}$	$1,3158 \cdot 10^{-3}$	1	$1,3595 \cdot 10$	$1,3332 \cdot 10^{-3}$
1 kp/m ² = 1 mm WS	9,807	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$9,6784 \cdot 10^{-5}$	$7,3556 \cdot 10^{-2}$	1	$9,8066 \cdot 10^{-5}$
1 bar = 10^6 dyn/cm ²	$1,0 \cdot 10^5$	1,0197	0,9869	$7,5006 \cdot 10^2$	$1,0197 \cdot 10^4$	1

Verwendete Abkürzungen:

N = Newton, Pa = Pascal, at = techn. Atmosphäre, atm = physikal. Atmosphäre, WS = Wassersäule, QS = Quecksilbersäule

Amerikanische und englische Einheiten

	N/m ²	Torr	Bar	Psi
1 psi = 1 lbf/sqi	$6,895 \cdot 10^3$	51,72	$6,895 \cdot 10^{-2}$	1
1 inch WS	249,10	1,8683	$2,490 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-2}$
1 inch QS	$3,378 \cdot 10^3$	25,4	$3,383 \cdot 10^{-2}$	0,489
1 lbf/ft ²	47,89	0,3592	$4,79 \cdot 10^{-4}$	$6,9456 \cdot 10^{-3}$

psi = pounds per square inch, lbf = pound force (Krafteinheit), ft = feet = 12 inches

Bild 1.1 Übersicht über einige wichtige Druckeinheiten

3 Drücke in strömenden Medien

3.1 Physikalische Grundlagen

3.1.1 Strömungsmechanische Grundlagen

Strömt eine zähe Flüssigkeit oder ein Zähigkeitsbehaftetes Gas entlang der Oberfläche eines Körpers, so wird infolge von Wandrauigkeiten und Oberflächenkräften die Strömung in Wandnähe abgebremst und schließlich zur Ruhe kommen.

Die Flüssigkeit oder das Gas haftet an der Wand. Damit verbunden ist die Entwicklung eines Geschwindigkeitsgradienten senkrecht zur Oberfläche, da die „Bremswirkung“ der Oberfläche mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche abnimmt.

Da alle realen Gase und Flüssigkeiten eine von Null verschiedene Zähigkeit besitzen, gilt das oben Gesagte ganz allgemein. Infolge des Geschwindigkeitsgradienten bewegen sich Flüssigkeitsschichten mit unterschiedlichen Abständen von der Wand verschieden schnell. Sie gleiten aneinander vorbei. Dieses „Vorbeigleiten“ verursacht eine der Bewegungsrichtung entgegengerichtete Schubspannung.

Newton postulierte, dass diese Schubspannung direkt proportional zum Geschwindigkeitsgradienten $\partial v / \partial n$ senkrecht zur Bewegungsrichtung ist.

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial n}$$

Im übrigen gibt es Flüssigkeiten, bei denen diese lineare Beziehung zwischen Schubspannung und Geschwindigkeitsgradienten nicht zutrifft, beispielsweise Blutströmungen.

Die Proportionalitätskonstante η wird als dynamische Viskosität oder auch Schicht- bzw. Scherviskosität bezeichnet. Die dynamische Viskosität ist für Gase und Flüssigkeiten nahezu unabhängig vom Druck, jedoch temperaturabhängig (Tabelle im Bild 3.1, Bild 3.2, 3.3).

Die schubspannungsbedingten Reibungskräfte müssen zur Aufrechterhaltung eines konstanten Strömungszustandes durch Druckkräfte in Strömungsrichtung kompensiert werden. Betrachtet man ein Element dl eines beliebigen Rohres in Richtung der Rohrachse und stellt für dieses Element die Kräftebilanz auf, so gilt, wie aus Bild 3.4 zu entnehmen ist,

$$A dp = -\tau_w U dl + \dot{m} dv$$

wobei A der Kanalquerschnitt, dp die Druckänderung entlang der Strecke dl , τ_w die Schubspannung an der Wand, U der sogenannte benetzte Umfang, \dot{m} der Massenstrom und dv die Geschwindigkeitsänderung in Richtung der Rohrachse bedeuten.

Die Berechnung des Reibungseinflusses auf Strömungsvorgänge unter Verwendung dieser Gleichung sei hier nicht weiter untersucht. Dies kann der einschlägigen Literatur entnommen werden. Die folgenden Überlegungen beschränken sich auf die Betrachtung der Strömung eines inkompressiblen Mediums in einem Rohr mit konstantem Durchmesser.

Bild 3.5 veranschaulicht die Entwicklung des Geschwindigkeitsprofils einer Rohrströmung. Zu einem bestimmten Zeitpunkt sei die Geschwindigkeit über den gesamten Rohrquerschnitt konstant. Wie bereits erläutert, werden im weiteren Verlauf der Strömung die wandnahen Flüssigkeitsschichten abgebremst. Die der Wand unmittelbar benachbarte Flüssigkeitsschicht wird nach einer gewissen Lauflänge schließlich völlig zur Ruhe kommen. Da aber aus Gründen der Kontinuität die mittlere Geschwindigkeit konstant bleibt, müssen die achsnahen Strömungsgebiete, die so genannte Kernströmung, beschleunigt werden. Nach einer gewissen Strecke, der Anlaufstrecke, entwickelt sich, wie bereits im Bild 3.5 skizziert ist, ein charakteristisches Geschwindigkeitsprofil, das sich stromab nicht mehr verändert. Man spricht von einer voll ausgebildeten Rohrströmung.

Das Strömungsgebiet zwischen Rohranfang und der voll ausgebildeten Rohrströmung wird mit Kanaleinlaufströmung bezeichnet. Das Geschwindigkeitsprofil in der voll ausgebildeten Strömung ist unabhängig vom Anfangsprofil am Rohreingang.

Bei einer inkompressiblen voll entwickelten Rohrströmung ist die Geschwindigkeitsänderung $\partial v / \partial l = 0$.

Es gilt folglich für den reibungsbedingten Druckabfall

$$dp/dl = -\tau_w \frac{U}{A}$$

Wie zahlreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen gezeigt haben, kann man für die Wandschubspannung mit guter Näherung schreiben.

$$\tau_w = \frac{\lambda}{8} \cdot \rho \cdot \bar{v}^2$$

der Proportionalitätsfaktor λ wird Rohrreibungszahl genannt, ρ ist die Dichte der Flüssigkeit und \bar{v} ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit.

Das Verhältnis $4A/U$ wird vielfach als hydraulischer Durchmesser d_H bezeichnet, damit lautet der reibungsbedingte Druckabfall Δp in einem Rohr der Länge L und konstanten Querschnittes für ein inkompressibles Medium der Dichte ρ und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d_H} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \bar{v}^2$$

Die durch die Reibung verursachte Kraft ist $K_R = \Delta p \cdot A$.

Bei ausgebildeter turbulenter Strömung an hydraulisch glatter Wand lässt sich die Rohrreibungszahl λ_o berechnen

$$\lambda_o = 0,3164 \cdot \text{Re}^{-0,25}$$

Die Reynoldszahl lässt sich über die Gleichung

$$\text{Re} = \frac{\bar{v} \cdot d}{\nu}$$

berechnen, wobei die kinematische Viskosität ν das Verhältnis zwischen Viskosität und Dichte ($\nu = \eta/\rho$) ist. Die Viskosität hängt von der Temperatur ab. Sie ist in den Diagrammen 3.1., 3.2 und 3.3 als Funktion von Temperatur dargestellt. Die Viskosität von Wasser bei einer Temperatur $t^\circ\text{C}$ wird durch die Formel

$$\log\left(\frac{\eta_{20}}{\eta_t}\right) = \frac{[1,37023 \cdot (t - 20) + 0,000836 \cdot (t - 20)^2]}{(109 + t)}$$

beschrieben. Die Viskosität von Wasser bei 20°C (η_{20}) beträgt $1,002 \text{ cP}$ (oder $1002 \mu\text{Pas}$). Die Dichte von Wasser wird bei Umgebungstemperatur 1000 kg/m^3 eingesetzt.

3.1.2 Systematische Messfehlerquellen bei der Druckmessung in strömenden Medien

Fehler bei der Anbringung der Druckbohrung.

Im Bild 3.7 sind sechs verschiedene Formen von Druckbohrungen und ihre Auswirkung auf den gemessenen Druck skizziert. Werden beim Anbringen der Druckbohrung Rohrgrate nicht beseitigt, kann die Flüssigkeit entweder lokal beschleunigt oder verzögert werden. Entsprechend ergibt sich eine lokale, die Druckmessung beeinflussende Erniedrigung oder Erhöhung des statischen Druckes. Durch Rohrwelligkeit können Querschnittsänderungen und damit Geschwindigkeitsänderungen verursacht werden.

Eine Querschnittserweiterung durch die Rohrwelligkeit am Messort führt zu einer Erhöhung des Druckes bzw. umgekehrt eine Querschnittsverengung zu einer Druckerniedrigung. Zu große Druckbohrungen schließlich können zu einer partiellen Aufstauung und damit ebenfalls zur Druckerhöhung führen.

Bei der Anbringung von Druckbohrungen an Rohrleitungen ist also darauf zu achten, dass diese senkrecht zur Rohrachse gratfrei und klein gegen den Rohrdurchmesser sind.

3.2 Versuchsaufbau und Versuchsführung zur Bestimmung der Rohrreibungszahl

Unter der Annahme einer ausgebildeten Rohrströmung soll aus dem Druckabfall entlang eines Rohres die Rohrreibungszahl bei verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt werden.

Im Bild 3.8 ist der Versuchsaufbau dargestellt.

Aus einem wassergefüllten Vorratsbehälter pumpt eine Umwälzpumpe mit konstanter Drehzahl Wasser durch das angeschlossene Rohrleitungssystem. Eine zwischen Behälter und Versuchsaufbau montierte Wasseruhr (Flügelradzähler) ermöglicht die Messung des Wasserverbrauchs. Zur Feinregulierung des Durchflusses ist vor der Wasseruhr eine Bypassleitung mit einem Ventil (Nr. 3) angeordnet. Die Grobregulierung erfolgt mit dem Absperrventil 1. Hinter der Wasseruhr teilt sich die Wasserzuführung in zwei Kreisläufe, die mit Absperrhähnen wahlweise eingeschaltet werden können. Beim Öffnen des Ventils 1 wird der Kreislauf zur Bestimmung der Rohrreibungszahl geöffnet. Wasser strömt in ein horizontal montiertes Rohr mit kreisförmigen Querschnitt von $10,1 \text{ mm}$ Durchmesser.

Nach einer Lauflänge von etwa 50fachem Rohrdurchmesser ist der Einlaufvorgang mit Sicherheit abgeschlossen. Die erste Druckanbohrung befindet sich 60 cm hinter dem Beginn des Rohres, und damit im Bereich der voll ausgebildeten Rohrströmung. An die Druckbohrung ist ein vertikales Steigrohr zur Druckmessung angeschlossen. Im Abstand von je 40 cm befinden sich zwei weitere Druckbohrungen mit angeschlossenen Steigrohrmanometern.

Der Vordruck wird durch Regeln der Ventile 1 und 3 so eingestellt, dass der höher liegende Schenkel der Wassersäule des ersten Manometers sich auf die Maßstabsmarke 450 mm einstellt (350 mm bzw. 250 mm). Die Zeit zum Durchfluss von 20 l wird gemessen und dabei die Anzeige der U-Rohrmanometer abgelesen. Daraus wird mit Hilfe der angegebenen Formel die Rohrreibungszahl berechnet. Ferner werden die Reynoldszahl und der Druckabfall pro Meter bei den eingestellten Werten bestimmt.

Schließlich ist die relative Abweichung $(\lambda_M - \lambda_T) / \lambda_T$ der im Versuch bestimmten Rohrreibungszahl λ_M von der im Bild 3.6 entnommenen Rohrreibungszahl λ_T für hydraulisch glatte Rohre zu bestimmen.

Nach Abschluss des Versuchs werden die bei falscher Anbringung von Druckbohrungen auftretenden Fehler demonstriert und diskutiert (physikalische Ursache der Druckfehlmessung).

3.3 Versuchsablauf

1. Vollständiges Öffnen des Beipassventils 3.
2. Öffnen des Absperrventils 1.
3. Einschalten der Umwälzpumpe (auf 1).
4. Einstellung auf etwa 450 mm im linken Manometer mit den Ventilen 1 und 3
5. Zeitmessung zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit beginnen.
6. Während die Zeitmessung läuft, Manometeranzeige ablesen und im Versuchsprotokoll notieren.
Die Steighöhen von jedem der drei Steigrohrmanometern werden abgelesen und protokolliert.
7. Wenn die Wasseruhr einen Verbrauch von 20 Litern anzeigt, wird die Zeitmessung beendet und die gestoppte Zeit notiert.
8. Die Durchflussgeschwindigkeit wird mit dem Ventil 1 so weit gedrosselt, bis sich im linken Steigrohr, das den höchsten Messdruck anzeigt, ein Wert von etwa 350 mm einstellt.
9. Messvorgang nach Punkt 5 bis 7 wiederholen.
10. Steighöhe von 250 mm wie in Punkt 8 beschrieben einstellen und Messung nach Punkt 5 bis 7 durchführen.
11. Berechnen der mittleren Durchflussgeschwindigkeit (Strömungsgeschwindigkeit) aus der Volumen- und Zeitmessung sowie den Rohrdimensionen nach

$$\bar{v} = \frac{V}{tA}$$

wobei \bar{v} ist die mittlere Geschwindigkeit, V das während der Zeit t durch das Rohr der Querschnittsfläche A ($A = \frac{1}{4} \pi d^2$, wobei Rohrdurchmesser $d = 10,1$ mm) geströmte Volumen.

Achten Sie auf die richtigen Einheiten:

12. Berechnen der mit dem Rohrdurchmesser d gebildeten Reynoldszahl ($Re = \frac{\bar{v} \cdot d}{\nu}$
Einheiten der eingesetzten Größen beachten.
13. Mittelwert der während einer Messung für ein Steigrohr abgelesenen Druckwerte bilden.
14. Berechnen der Rohrreibungszahl λ aus der mit jeweils zwei Druckwerten gebildeten Differenz (z.B. $\Delta p = p_1 - p_2$ oder $\Delta p = p_1 - p_3$; p_1, p_2, p_3 mittlerer Druck aus der ersten, zweiten bzw. dritten Messstelle) und den Abständen der Messstelle ($L_1 - L_2 = L_2 - L_3 = 400 \text{ mm} = 40 \text{ cm}$; und $L_1 - L_3 = 800 \text{ mm} = 80 \text{ cm}$).
(Umrechnungsfaktoren für die Druckeinheit können dem Bild 1.1 entnommen werden).
Achten Sie unbedingt auf die richtigen Einheiten!
15. Berechnen der Rohrreibungszahl λ_o und Bilden der prozentualen relativen Abweichungen $F = (\lambda_{ik} - \lambda_o) / \lambda_o \cdot 100$ der durch Messung ermittelten λ_{ik} .

Messprotokoll-3

Datum:

Matr.-Nr.:

Zeit.

Name:

Versuch 3: Bestimmung der Rohrreibungszahl

Messzeit t(s) für V = 20 Liter			Mittlere Geschwindigkeit \bar{v} (m/s)			Reynoldzahl Re		
1.Messreihe	2.Messreihe	3.Messreihe	1.Messreihe	2.Messreihe	3.Messreihe	1.Messreihe	2.Messreihe	3.Messreihe

	1. Messreihe			2. Messreihe			3. Messreihe		
	Rohr 1	Rohr 2	Rohr 3	Rohr 1	Rohr 2	Rohr 3	Rohr 1	Rohr 2	Rohr 3
	h_1	h_2	h_3	h_1	h_2	h_3	h_1	h_2	h_3
Ablesung									
Δp (N/m ²)	Δp_{12}		Δp_{13}	Δp_{12}		Δp_{13}	Δp_{12}		Δp_{13}

$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$; $\Delta L = 40 \text{ cm}$; $d_H = d_{\text{Rohr}} = 0,0101 \text{ m}$;
 v aus Diagramm 3.3; Temperatur $\text{H}_2\text{O} \sim 22 \text{ }^\circ\text{C}$

Rohrreibungszahl λ								
(Diagramm) λ_0			λ_{12} (rechnerisch)			λ_{13} (rechnerisch)		
1.Messreihe	2.Messreihe	3.Messreihe	1.Messreihe	2.Messreihe	3.Messreihe	1.Messreihe	2.Messreihe	3.Messreihe
% Relative Abweichung = $\frac{\lambda_{ik} - \lambda_0}{\lambda_0} * 100$								

GASE

Luft
Stickstoff
Wasserstoff
Ammoniak
Kohlendioxid

 $10^5 \eta_0 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}} \right]$

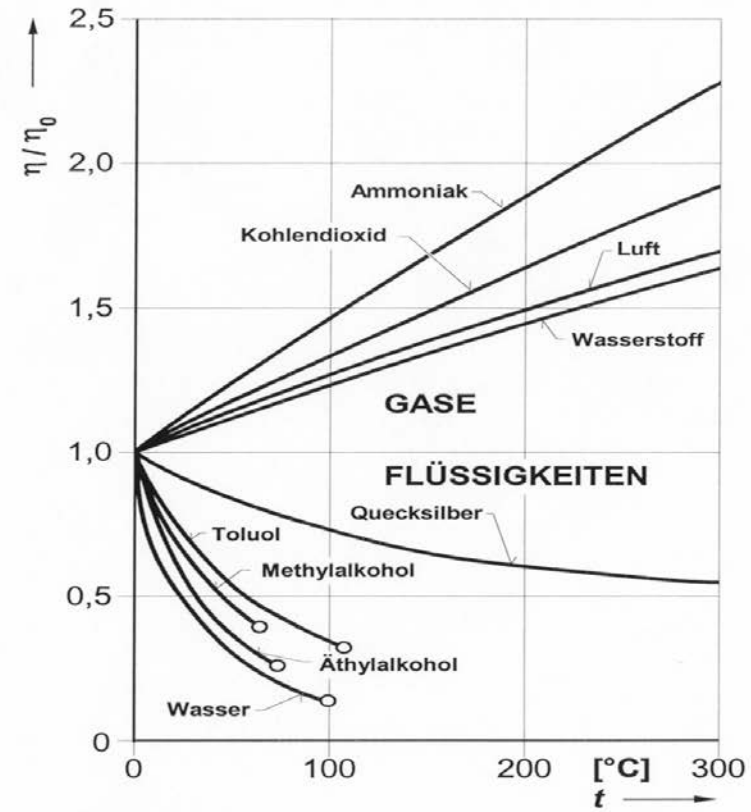
1,716
1,651
0,835
0,899
1,370

FLÜSSIGKEITEN

Wasser
Toluol
Methylalkohol
Äthylalkohol
Quecksilber

 $10^3 \eta_0 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}} \right]$

1,791
0,770
0,816
1,769
1,698

Bild 3.1**Bild 3.2**

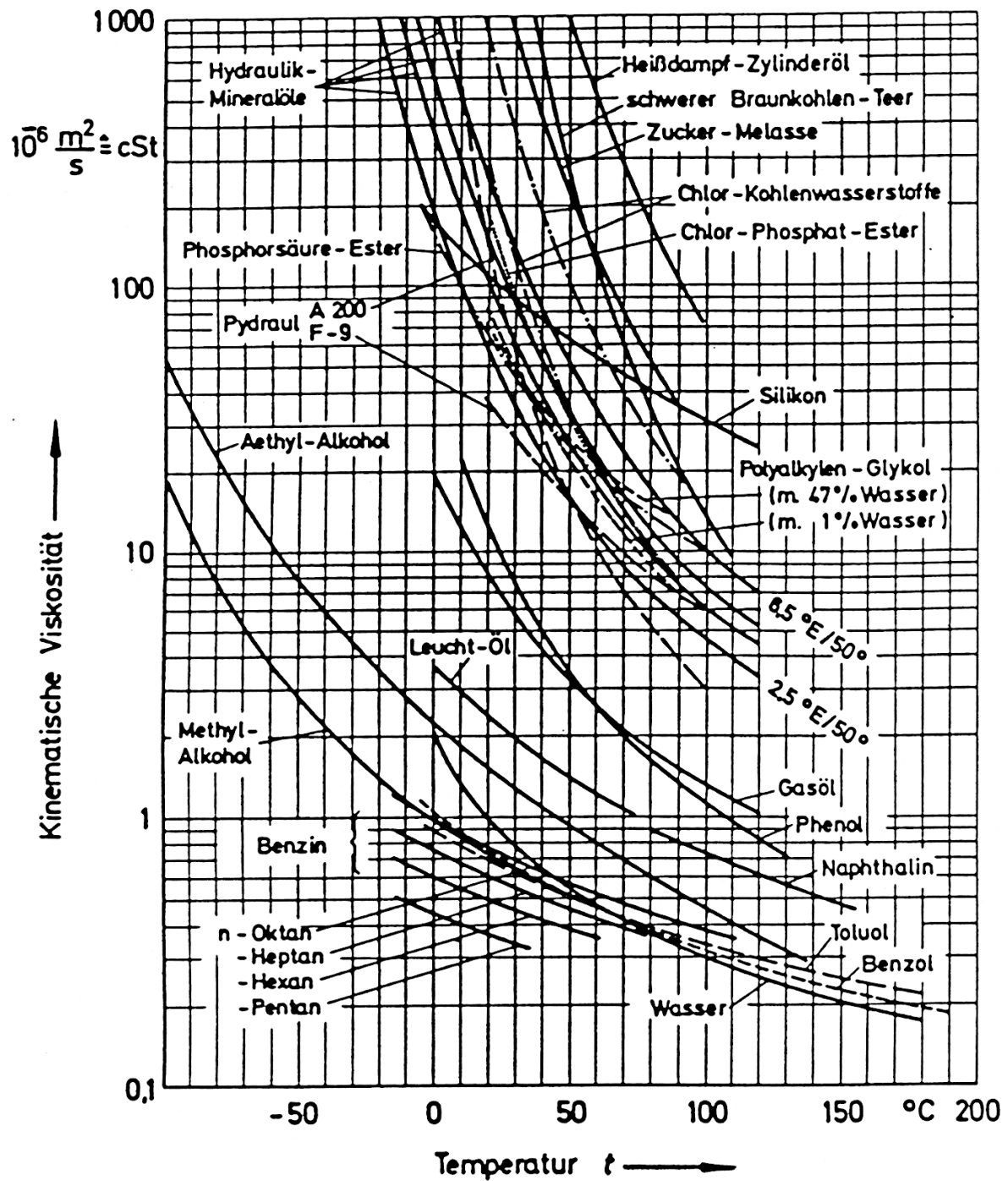


Bild 3.3 Temperatureinfluss auf die kinematische Viskosität

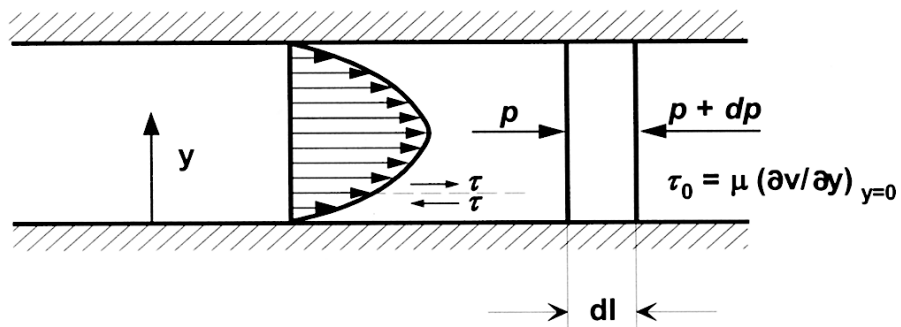


Bild 3.4 Kräftebilanz beim durchströmten Rohr mit Reibung

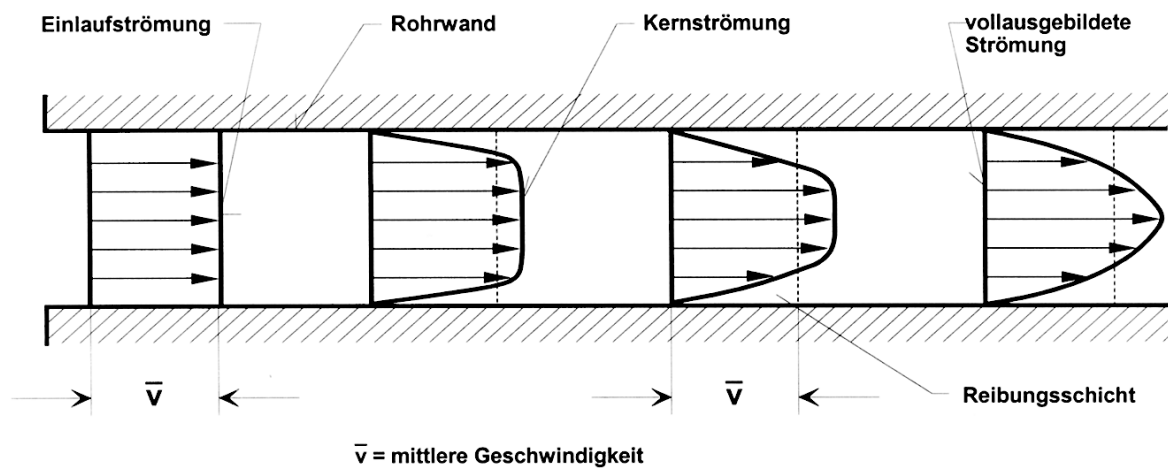


Bild 3.5 Entwicklung der Geschwindigkeitsverteilung von gleichmässigen bis zum vollausbildeten Geschwindigkeitsprofil im Einlauf eines Rohres

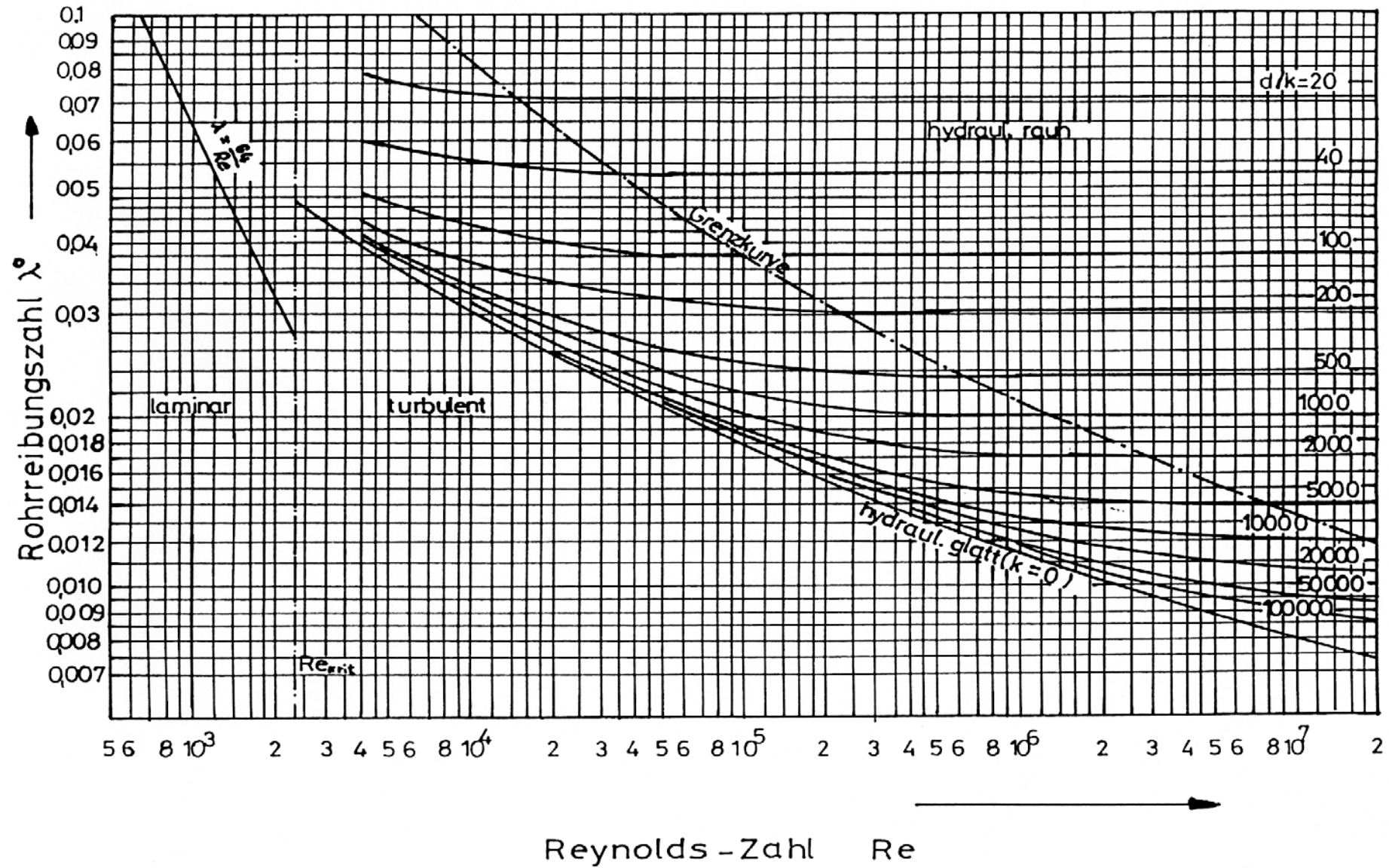


Bild 3.6 Rohrreibungszahl in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl

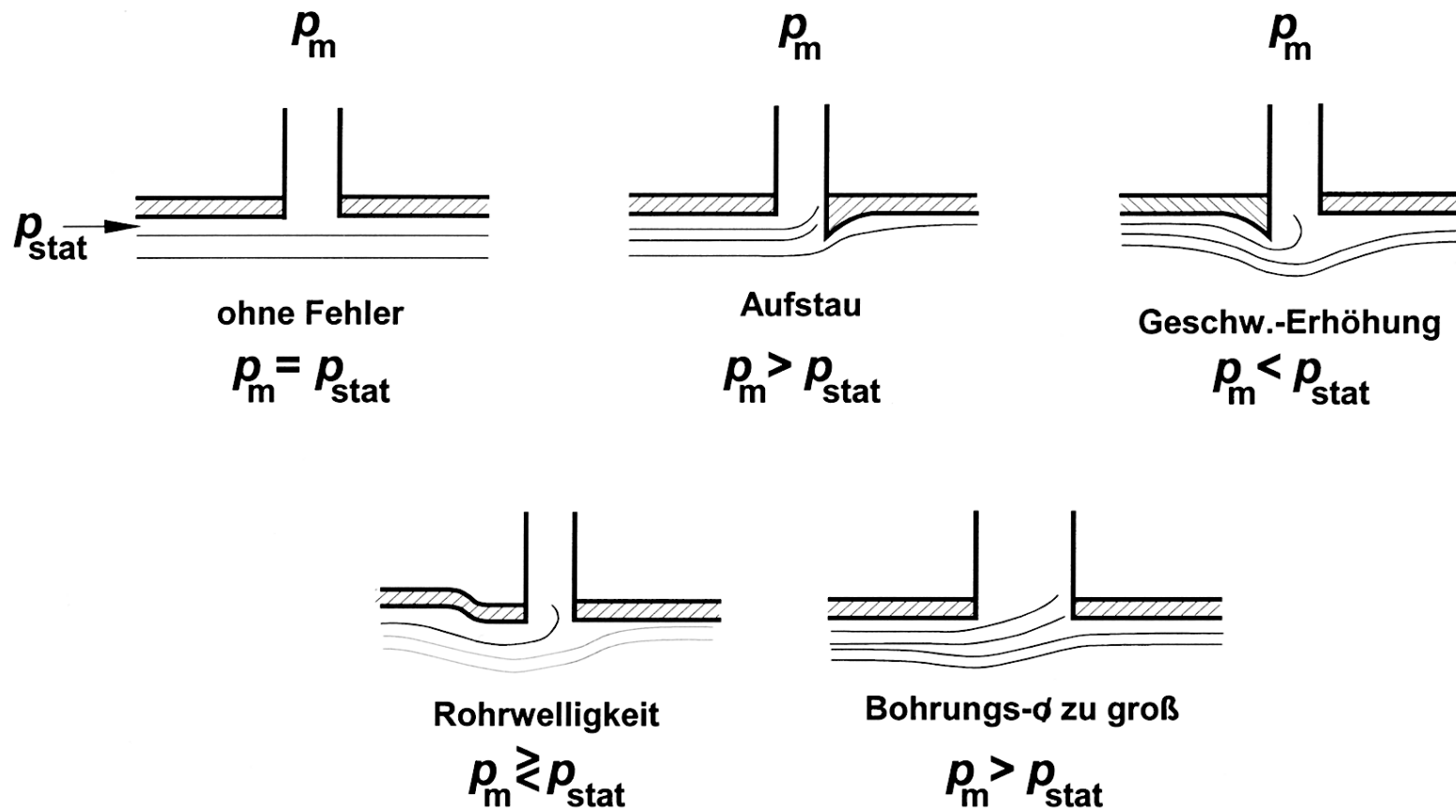


Bild 3.7 Auswirkung von falsch angebrachten Bohrungen auf gemessenen Druck p_m

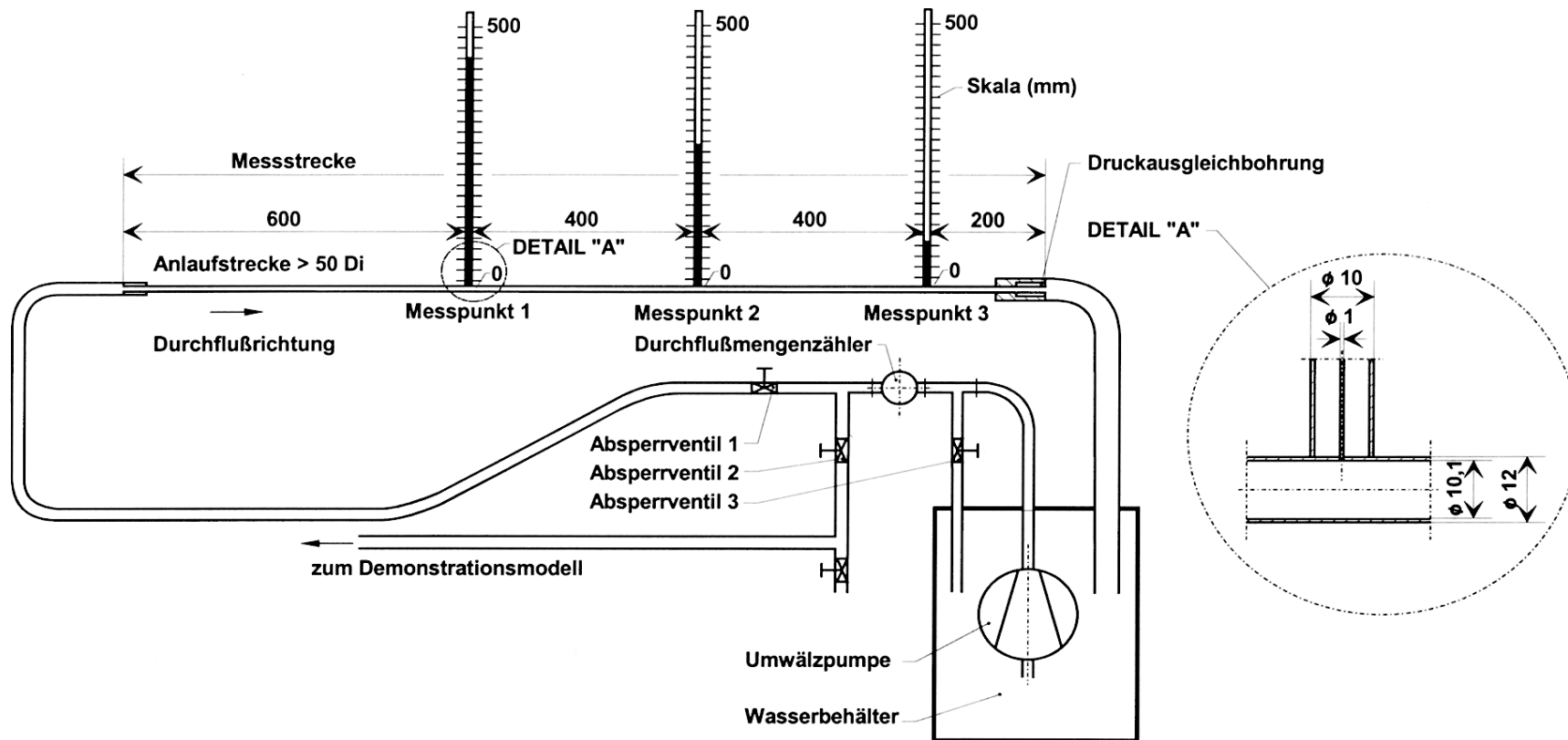


Bild 3.8 Schema des Versuchsaufbaues zur Bestimmung der Rohrreibungszahl

Literatur

- Eder, F.X. Moderne Messmethoden der Physik, Teil 1
Deutscher Verlag der Wissenschaften,
Berlin 1968
- Hengstenberg, J. Messen und Regeln in der chemischen Verfahrenstechnik
Sturm, B. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1964
Winkler, D.
- Gramberg, A. Technische Messungen bei Maschinenuntersuchungen und
zur Betriebskontrolle,
7. Auflage, Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1959
- Pankhurst, R.C. Wind Tunnel Technique
Holder, D.W. Pitmann, London, 1952
- Pope, A. High Speed Wind Tunnel Testing
Goin, D.L. Wiley, New York, 1960
- Pope, A. High Speed Wind Tunnel Testing
Harper, J.J. Wiley, New York, 1966
- DIN-Normen DIN 16005
 DIN 16129
 DIN 16130
 DIN 16254
 DIN 16255
 DIN 28400
- Popow, S.G. Strömungstechnisches Messwesen,
Verlag Technik, Berlin, 1960
- Prandl, L. Strömungslehre, 1. Auflage
Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1969
- Rohrbach, C. Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen
VDI-Verlag, Düsseldorf, 1967
- Tuckenbrodt, E. Strömungsmechanik
Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1968
- Wüst, W. Strömungsmesstechnik
Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1965
- Jaeckel, R. Kleinste Drücke, ihre Messung und Erzeugung
Springer, Berlin, Lüttingen, Heidelberg, 1950