



Praktikum "Experimentelle Strömungsmechanik"

Versuch S3: Reibungsverluste in Rohrleitungen und Fittings

Inhalt

1. Aufgabenstellung	2
2. Theoretische Grundlagen	2
2.1. Druckverluste bei laminarer Strömung in Rohren	3
2.2. Druckverluste bei turbulenter Strömung in Rohren	3
2.3. Druckverluste bei turbulenter Strömung in Rohrkrümmern und in Querschnittsveränderungen	5
2.3.1. Rohrkrümmer mit kreisförmigem Querschnitt	5
2.3.2. Querschnittsänderungen	6
2.4. Druckmessungen	7
3. Versuchsaufbau und Grundlegendes zur Bedienung der Versuchsstände	8
3.1. Aufbau und Wirkungsweise des Teilversuchsstandes 1 für laminare Rohrströmung	8
3.2. Aufbau und Wirkungsweise des Teilversuchsstandes 2 für turbulente Strömung in Rohrleitungen und Fittings	9
3.3. Entlüftung der Druckmessleitungen	10
3.3.1. Niederdruck-Differenzdruckmesser am Teilversuchsstand 1	10
3.3.2. Elektronischer Differenzdruckmesser und Zweifach-Manometer am Teilversuchsstand 2	10
3.4. Einstellen der Nulllage am Zweifach-Manometer	10
4. Versuchsdurchführung	11
5. Versuchsauswertung	12
6. Literaturhinweise	13
7. Zusatzinformationen	14
8. Messtabellen (Beispiele)	17

1. Aufgabenstellung

1. Ermitteln Sie den effektiven Durchmesser einer Rohrleitung aus Messungen des Volumenstroms und des Druckverlustes bei der Strömung im laminaren Bereich.
2. Ermitteln und vergleichen Sie Druckverluste und Druckverlustbeiwerte von verschiedenen Rohrleitungen und Rohrleitungsbauteilen (Fittings).

2. Theoretische Grundlagen

Rohrleitungen sind wichtige Bauteile in Anlagen der Verfahrenstechnik, Umwelttechnik, Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik sowie in Fahr- und Flugzeugen. Auch in der Medizin spielen „Rohrleitungen“ z. B. in Form von Blutgefäßen eine wichtige Rolle.

Die durch Rohrleitungen strömenden Fluide (Flüssigkeiten, Gase) setzen der Strömung aufgrund der inneren Reibung einen Widerstand entgegen. Hierdurch wird während der Strömung permanent Energie dissipiert, die zur Erhaltung der Strömung durch geeignete technische Geräte wie Pumpen, Verdichter usw. zugeführt werden muss. Die Strömung ist charakterisiert durch die Eigenschaften der strömenden Flüssigkeit, das Strömungsregime (laminar, turbulent) sowie die Geometrie der Rohre und die Beschaffenheit der Rohrwand (glatt, rau). Durch Messung des Volumenstroms, Messung des Druckabfalls längs einer Rohrleitung oder eines Bauteils sowie aus der Kenntnis der Oberflächenbeschaffenheit des Rohres und der Fließeigenschaften des Fluids können grundlegende Aussagen über die Strömung getroffen werden. Die Ergebnisse sind wichtig zum Verständnis verschiedener Strömungstypen. Sie sind Voraussetzung u. a. für die Dimensionierung von Rohrleitungen und Strömungsmaschinen.

In dimensionsanalytischen Überlegungen und experimentellen Untersuchungen zeigt sich, dass bei Einführung einer Definitionsgleichung für den Druckverlust in einem Einzelbauteil

$$\Delta p_V = \zeta \frac{\rho_F}{2} \bar{u}^2 \quad (1)$$

der *Druckverlustbeiwert* ζ von der Gestalt des Bauteiles und dessen Oberflächenbeschaffenheit und von der Geschwindigkeit \bar{u} bzw. der mit ihr gebildeten REYNOLDSzahl Re

$$Re = \frac{\rho_F \bar{u} d}{\eta_F} \quad (2)$$

abhängt. ρ_F , η_F bzw. d sind hier die Dichte und die dynamische Viskosität des Fluids bzw. der (gleichwertige¹) Durchmesser des Strömungsgebietes.

Für die Reihenschaltung von Einzelbauteilen (Rohrleitungen, Krümmer, Querschnittsänderungen, Ventilen usw.) addieren sich die einzelnen Druckverluste:

$$\Delta p_{V,ges} = \sum_i \zeta_i \frac{\rho_F}{2} \bar{u}_i^2 \quad (3)$$

¹ Der gleichwertige Durchmesser $d_{gr} = 4A/U$ wird bei Strömungsgebieten mit nicht-kreisförmigem Querschnitt der Fläche A und des Umfanges U benutzt.

In Rohren mit konstantem Durchmesser sind die Druckverluste proportional zur Länge l und zum Quadrat der mittleren Geschwindigkeit sowie indirekt proportional zum Rohrdurchmesser d :

$$\Delta p_V = \zeta_{\text{Rohr}} \frac{\rho_F \bar{u}^2}{2} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho_F \bar{u}^2}{2} \quad (4)$$

Hierbei ist $\lambda = \zeta_{\text{Rohr}} \frac{d}{l}$ der *Rohrreibungsbeiwert* oder die *Widerstandszahl*.

2.1. Druckverluste bei laminarer Strömung in Rohren

Der Zusammenhang zwischen dem Volumenstrom \dot{V} und dem Druckverlust Δp_V führt nur für die voll ausgebildete laminare Rohrströmung auf eine einfache analytische Beziehung (HAGEN-POISEUILLESches Gesetz, vgl. Versuch S2: Untersuchung des Übergangs von laminarer zu turbulenter Strömung):

$$\dot{V} = \frac{\pi d^4 \Delta p_V}{128 \eta l} = \frac{\Delta p_V d^2}{32 \eta l} \cdot \frac{\pi}{4} d^2 = \bar{u} \cdot A. \quad (5)$$

Sind der Druckverlust über einer bestimmten Länge l , der Volumenstrom sowie die Viskosität des Fluids bekannt, kann der Durchmesser der durchströmten Rohrleitung ermittelt werden:

$$d = \sqrt[4]{\frac{128 \eta l \dot{V}}{\pi \Delta p_V}} \quad (6)$$

Aus Gl. (5) lässt sich durch einfache Umformungen

$$\Delta p_V = \frac{8 \eta_F \dot{V}}{\pi R^4} = \frac{128 \eta_F l \cdot \bar{u} \cdot \frac{\pi}{4} d^2}{\pi d^4} = \frac{64}{\text{Re}} \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho_F \bar{u}^2}{2} = \underbrace{\left[\frac{\lambda}{d} \right]}_{\zeta} \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho_F \bar{u}^2}{2} \quad (7)$$

zeigen, dass der Rohrreibungsbeiwert λ für laminare Rohrströmungen ($\text{Re} < 2320$) mit

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} = f(\text{Re}) \quad (8)$$

berechnet werden kann. Dieser ist nur von der Re-Zahl abhängig.

2.2. Druckverluste bei turbulenter Strömung in Rohren

In Rohrleitungen mit Einbauten wie Krümmern, Ventilen, Düsen usw. und insbesondere bei turbulenter Rohrströmung sind die Strömungsverhältnisse so kompliziert (dreidimensional, instationär), dass sie feldmäßig nicht bzw. nur mit erheblichem Aufwand zugänglich sind.

Für die Ermittlung technisch relevanter integraler Größen wird deshalb ein einfaches, quasi-eindimensionales Berechnungsmodell, das *Stromfadenmodell*, angewendet. Beim Stromfadenmodell wird vorausgesetzt, dass die über den Rohrquerschnitt gemittelten Größen wie mittlere Geschwindigkeit \bar{u} und Druck \bar{p} nur geringfügige Abweichungen gegenüber den konstanten

Größen einer Blockströmung haben. Unter dieser Voraussetzung lautet die BERNOULLI-Gleichung mit Verlustterm

$$\underbrace{p_E - p_A}_{\text{statischer Druck}} + \underbrace{\frac{\rho_F}{2}(\bar{u}_E^2 - \bar{u}_A^2)}_{\text{Staudruck}} + \underbrace{\rho_F g(\bar{z}_E - \bar{z}_A)}_{\text{hydrostatischer Druck}} = \Delta p_V \Big|_A^E \quad (9)$$

Die \bar{z}_i , p_i und \bar{u}_i sind hierbei die statischen Höhen, statischen Drücke und mittleren Geschwindigkeiten am Ein- (E) bzw. Austritt (A) des betrachteten Bereiches. ρ_F ist die Dichte des strömenden Fluids. Die durch Reibung hervorgerufenen Verluste an mechanischer Energie werden in einem Druckverlustterm Δp_V erfasst, der nur bei inkompressiblen Strömungen ein Maß für die in Wärme umgewandelte Energie darstellt. Dieser "Verlust" Δp_V kann sich sowohl durch Verminderung des statischen Druckes als auch durch Reduzierung der kinetischen Energie und/oder der potentiellen Energie bemerkbar machen. Für ein beliebiges Bauteil kann Δp_V i. a. nur experimentell bestimmt werden.

Für turbulente Strömungen ($Re > 2320$) gilt entsprechend einer Dimensionsanalyse ganz allgemein

$$\lambda = f(Re, k/d) \quad (10)$$

Während Wandrauigkeiten (relative Rauigkeit k/d , k ...Rautiefe, d ...Rohrdurchmesser) die Strömungsverluste bei der laminaren Strömung nicht beeinflussen, spielt die Oberflächenbeschaffenheit bei der turbulenten Strömung eine wesentliche Rolle. Rauigkeiten, deren Höhe die Dicke der laminaren Unterschicht überschreiten, erhöhen die Verluste wesentlich. Eine allgemeingültige Gleichung zur Beschreibung der Verluste für turbulente Strömungen ist nicht bekannt. Die Abhängigkeit der Rohrreibungsbeiwerte von der REYNOLDSzahl und der relativen Rauigkeit wurde für die turbulente Strömung experimentell ermittelt (vgl. Diagramm in Abb. 11 auf S. 16). Für begrenzte Bereiche des Diagramms konnten die Verläufe durch Approximationsgleichungen angenähert werden:

- hydraulisch glattes Rohr $\lambda = \lambda(Re)$:

$$\boxed{Re^{7/8} \frac{k}{d} < 5}$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg(Re \sqrt{\lambda}) - 0.8 \quad (\text{PRANDTL}) \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (\text{BLASIUS}) \quad (12)$$

- nahezu rau (Übergangsbereich) $\lambda = \lambda(\text{Re}, k/d)$:

$$5 \leq \text{Re}^{7/8} \frac{k}{d} < 225$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + 0.269 \frac{k}{d} \right) \quad (\text{COLEBROOK}) \quad (13)^2$$

- volle Rauigkeitsströmung $\lambda = \lambda(k/d)$:

$$\text{Re}^{7/8} \frac{k}{d} \geq 225$$

$$\lambda = \left(1.138 - 2 \lg \frac{k}{d} \right)^{-2} \quad (\text{NIKURADSE}) \quad (14)$$

Die Gln. (11) und (13) sind implizite Gleichungen und müssen iterativ gelöst werden. Dazu wird ein Schätzwert von λ in die Gleichungen eingesetzt und ein verbessertes λ berechnet (soweit die Iteration konvergiert).

2.3. Druckverluste bei turbulenter Strömung in Rohrkrümmern und in Querschnittsveränderungen

Richtungsänderungen der Strömung und Querschnittsveränderungen führen zu zusätzlichen Druckverlusten gegenüber der Strömung in geraden Rohren. Ursache hierfür ist neben der Dissipation in Wandnähe (durch das Auftreten von Schubspannungen) die Dissipation infolge gegenüber der Strömung in geraden Rohrleitungen zusätzlich auftretender Verwirbelungen.

2.3.1. Rohrkrümmer mit kreisförmigem Querschnitt

Der Druckverlust in einem Krümmer mit dem Umlenkwinkel α setzt sich nach Gl. (3) additiv aus dem Beitrag der "abgewickelten" Rohrlänge ($\pi R_B \alpha / 180^\circ$) mit R_B als Krümmungsradius des Rohrbogens, den Abständen "Krümmer-Druckmessstelle" (l_1, l_2) und dem Beitrag durch die Richtungsänderung zusammen:

$$\Delta p_v = \left(\lambda \left(\frac{\alpha}{180^\circ} \frac{\pi R_B}{d} + \frac{l_1}{d} + \frac{l_2}{d} \right) + \zeta_{kr} \right) \frac{\rho_F \bar{u}^2}{2} \quad (15)$$

Der Druckverlustbeiwert ζ_{kr} wird experimentell bestimmt. Aus Abb. 7 ist ersichtlich, dass vor bzw. nach dem Krümmer noch gerade Rohrleitungsabschnitte der Länge l vorhanden sind. Diese müssen entsprechend Gl. (15) berücksichtigt werden. Zur Berechnung des Druckverlustbeiwertes aus dem experimentell ermittelten Druckverlust Δp_v erhält man somit

$$\zeta_{kr} = \frac{\Delta p_v}{\frac{\rho_F \bar{u}^2}{2}} - \left(2 \cdot \lambda \frac{l}{d} + \lambda \frac{\alpha}{180^\circ} \frac{\pi R_B}{d} \right) \quad (16)$$

In Nachschlagewerken findet man auch Näherungsformeln (z. B. nach IDELCHIK) zur Berechnung des Druckverlustbeiwertes (siehe auch Abb. 7):

² Für ein hydraulisch glattes Rohr mit $k=0$ geht Gl. (13) in Gl. (11) über.

$$\zeta_{Kr} = \frac{C_\alpha C_{Re} C_k C_Q}{\sqrt{R_B / d}} \quad (17)$$

Es bedeuten: $C_\alpha = 0.21$

Umlenkbeiwert (90°-Krümmer)

$$C_{Re} = \begin{cases} 20.2 \text{Re}^{-0.25} & 3 \cdot 10^3 < \text{Re} < 10^5 \\ 1 & 10^5 < \text{Re} \end{cases} \quad \text{REYNOLDSzahl-Beiwert}$$

$$C_k = \begin{cases} 1 & 0 < k/d < 0.47 \text{Re}^{-0.75} \\ 1 + 10^3 k/d & 0.47 \text{Re}^{-0.75} < k/d < 10^{-3} \\ 2 & 10^{-3} < k/d \end{cases} \quad \text{Rauigkeitsbeiwert (Re} > 4 \cdot 10^4)$$

$$C_Q = 4 \quad \text{Krümmer mit Kreisquerschnitt}$$

2.3.2. Querschnittsänderungen

Bei *unstetigen Querschnittsveränderungen* kann die Strömung insbesondere bei höheren REYNOLDSzahlen von der Wand ablösen, es bilden sich ein Strahl im Zentrum und Rezirkulationsgebiete am Rand aus, die zu zusätzlichen Strömungsverlusten führen. Der Extremfall für eine Querschnittsänderung ist der sprunghafte Übergang eines zylindrischen Rohres mit der Querschnittsfläche A_1 auf eine Querschnittsfläche A_2 mit $A_1 < A_2$ bei Querschnittserweiterungen (Carnotscher Stoßverlust³) bzw. $A_1 > A_2$ bei Querschnittsverringern. Im letzteren Fall schnürt sich der Strahl ein und hat in seinem engsten Querschnitt die Querschnittsfläche $A_0 < A_2$. Das Einschnüren wird durch die Kontraktionszahl $\varepsilon = A_0/A_2$ beschrieben. Aus der BERNOULLI-Gleichung können die theoretischen Beziehungen für die Druckverlustanteile Δp_v bei Querschnittsänderungen hergeleitet werden:

$$\text{Erweiterung:} \quad \frac{\Delta p_{v,EC}}{\frac{\rho_F \bar{u}_1^2}{2}} = \zeta_{EC} = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 \quad (18)$$

$$\text{Verengung:} \quad \frac{\Delta p_{v,VC}}{\frac{\rho_F \bar{u}_2^2}{2}} = \zeta_{VC} = \left(\frac{A_2}{A_0} - 1 \right)^2 = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2 \quad (19)$$

Da die bei Verengung auftretende Einschnürung des Strömungsquerschnittes A_0 unbekannt ist, muss für diesen Fall der ζ -Wert experimentell ermittelt werden.

³ siehe hierzu Becker, E. Technische Strömungslehre S. 65ff

Die Ergebnisse sind in Abb. 1 dargestellt. Der Druckverlust kann mittels eines Polynoms entsprechend dem real vorhandenen Verhältnis der Querschnittsflächen A_2/A_1

$$\zeta = k_0 + k_1 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1}\right) + k_2 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 + k_3 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^3 \quad (20)$$

mit den Parametern $k_0 = 0.50664$, $k_1 = -0.41638$, $k_2 = 0.04792$ und $k_3 = -0.13491$ berechnet werden.

Bei *stetigen Querschnittsveränderungen* treten infolge der inneren Reibung auch Druckverluste auf, diese sind jedoch im allgemeinen bei gleichen Flächenverhältnissen wesentlich kleiner als die Carnotschen Stoßverluste.

Der Rohrreibungsbeiwert für die Querschnittsänderung an der Anlage ergibt sich aus der „Bernoulli-Gleichung mit Verlusten“ zu

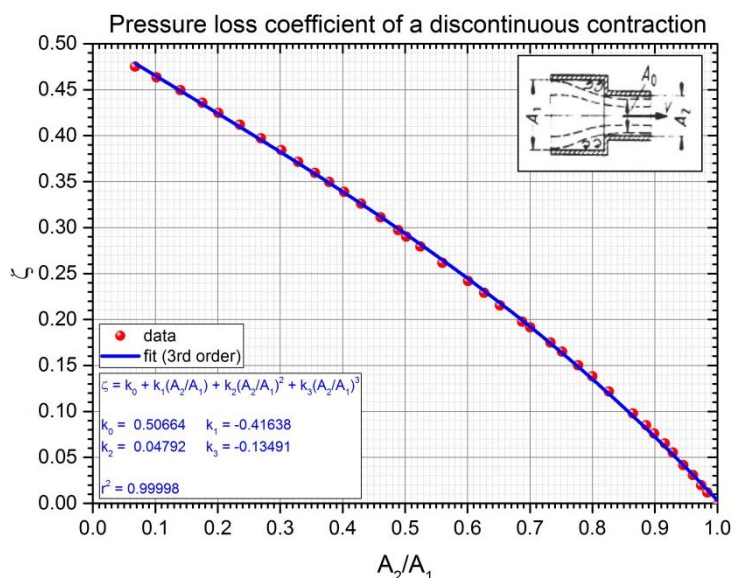


Abb. 1: Druckverlustbeiwert für unstetige Querschnittsverringerungen

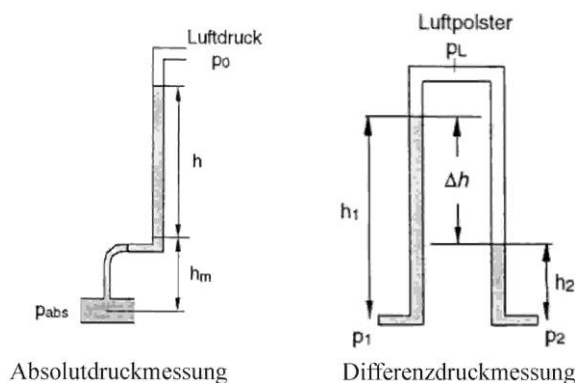
$$\zeta = \frac{\Delta p_V}{\frac{\rho_F \bar{u}_2^2}{2}} - \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \right] - \left[\lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 + \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \right] \quad (21)$$

mit Δp_V als gemessener Druckverlust. Die geometrischen Daten sind Abb. 7 zu entnehmen. Der dritte Term auf der rechten Seite berücksichtigt die Druckverluste der geraden Rohrstück vor bzw. nach der Verengung.

2.4. Druckmessungen

In der Strömungsmechanik wird u. a. zwischen Absolutdruck und Differenzdruck unterschieden (Abb. 2). Der Absolutdruck ist der Druck an einer Stelle z. B. in einer Rohrleitung unter Berücksichtigung des Umgebungsdruckes. Er kann bei Messung mit Steigrohrmanometern mit der Beziehung

$$p_{abs} = p_0 + \rho_F g(h + h_m) \quad (22)$$



berechnet werden. Hierbei sind p_0 der Umgebungsdruck, ρ_{Sp} die Dichte des Sperrfluids im Manometer und h die Gesamthöhe der Flüssig-

keitssäule, gemessen von der Druckmessstelle bis zur Oberkante der Flüssigkeitssäule im Manometer.

Der Differenzdruck wird zwischen zwei Messstellen gemessen. Hierzu wird ein Differenzdruckmanometer verwendet. Der einfachste Fall ist ein U-Rohr-Manometer, bei dem beide Schenkel mit Druckmessstellen verbunden sind. Es gilt

$$p_1 = p_L + \rho_{sp}gh_1, \quad p_2 = p_L + \rho_{sp}gh_2 \quad (23)$$

Der Differenzdruck bestimmt sich dann zu

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho_{sp}g(h_1 - h_2) = \rho_{sp}g\Delta h \quad (24)$$

Hierbei wurde stillschweigend vorausgesetzt, dass die Dichte der Luft klein gegenüber der Dichte des Fluids im Manometer ist ($\rho_L \ll \rho_{sp}$). Über den Druck des Luftpolders lässt sich der Nullpunkt für die Differenzdruckmessung einstellen.

3. Versuchsaufbau und Grundlegendes zur Bedienung der Versuchsstände

3.1. Aufbau und Wirkungsweise des Teilversuchsstandes 1 für laminare Rohrströmung

Der prinzipielle Aufbau des Teilversuchsstandes 1 ist in Abb. 3 dargestellt. Aus einem unteren Sammelbehälter wird mit einer Tauchpumpe das Fluid (Wasser) in den oberen Behälter gepumpt. Durch eine geeignete konstruktive Gestaltung bleibt der Flüssigkeitsstand hier konstant. Die hydrostatische Druckkraft, die sich aus der Höhe h ergibt, ist die für die Strömung treibende Kraft. Die beiden Rohrleitungen können mittels des Dreiwegehahns unabhängig voneinander in den Strömungskreislauf gebracht werden. Der durch die Rohrleitungen fließende Volumenstrom wird mit dem

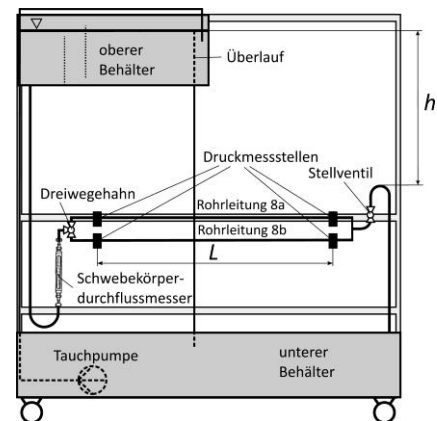


Abb. 3: Ansicht des Versuchsstandes 1

Stellventil eingestellt und kann am Schwebekörper-Durchflussmesser abgelesen werden. An beiden Rohren befinden sich in einem Abstand $L=1200\text{ mm}$ jeweils zwei Druckmessstellen. Für die Messung kleinster Differenzdrücke wird ein Niederdruck-Differenzdruckmesser (NDDM) eingesetzt, dessen Messbereich $0\text{...}10\text{ mbar}$ beträgt. Der NDDM ist mit einer standardisierten Schnittstelle für das Ausgangssignal ausgerüstet, deren Ausgangsstrom im Bereich $4\text{...}20\text{ mA}$ liegt. Die Größe des Ausgangstroms in mA wird an einem Display am Teilversuchsstand 2 angezeigt und kann unter Verwendung der Eichkurve (Abb. 10) bzw. der nur für den Bereich kleiner Differenzdrücke ($0\text{...}0.2\text{ mbar (20 Pa)}$) anwendbaren Gleichung

$$\Delta p = 6.362\text{ Pa/mA} \cdot (I - 4\text{ mA}) + 11.751\text{ Pa} \quad (25)$$

in den entsprechenden Differenzdruck in Pa umgerechnet werden.

3.2. Aufbau und Wirkungsweise des Teilversuchsstandes 2 für turbulente Strömung in Rohrleitungen und Fittings

Der prinzipielle Aufbau des Teilversuchsstandes 2 für die turbulenten Rohrströmungen ist in Abb. 4 dargestellt. Als Flüssigkeit wird Wasser eingesetzt.

Kernstücke des Versuchsstandes sind verschiedene Rohrstrecken, die sich durch verschiedene Rohrdurchmesser bei gleichem Material, nahezu gleiche Rohrdurchmesser bei verschiedenen Materialien sowie verschiedene Rohrleitungsbauteile (Winkel, Bogen, Erweiterungen, Verengungen) unterscheiden. Die Anordnung der verschiedenen Rohrstrecken sowie Angaben zur Geometrie der Rohrleitungen sind in Abb. 6 auf S. 14 dargestellt⁴. Beachten Sie, dass für die Cu- und PVC-Rohrleitungen der Außendurchmesser d_a und die Wandstärke δ angegeben sind ($d_a \times \delta$). Der Innendurchmesser dieser Rohrleitungen beträgt also $d_i = d_a - 2 \cdot \delta$.

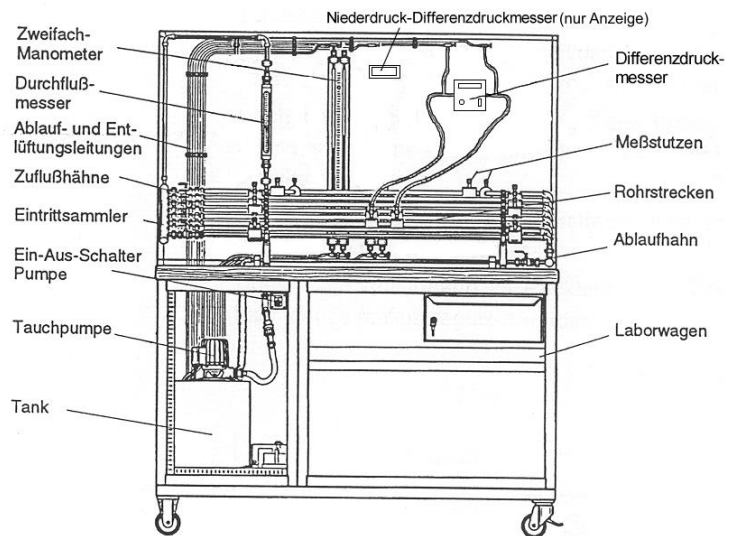


Abb. 4: Ansicht des Versuchsstandes „Turbulente Rohrströmungen“

Abb. 5 zeigt das Funktionsprinzip des Versuchsstandes. Eine Pumpe fördert einen mit einem Ablaufhahn einstellbaren Volumenstrom aus einem Tank. Der Volumenstrom wird mit einem Schwebekörper-Durchflussmesser gemessen, auf dessen Glaszylinder sich eine Prozenteinteilung befindet, an der der prozentual auf den maximalen Volumenstrom ($100\% \hat{=} 1960 \text{ l/h}$) bezogene Volumenstrom je nach Position des Schwebekörpers abgelesen werden kann. Jede Rohrleitung kann mittels eines Zuflusshahnes in den Wasserkreislauf gebracht werden.

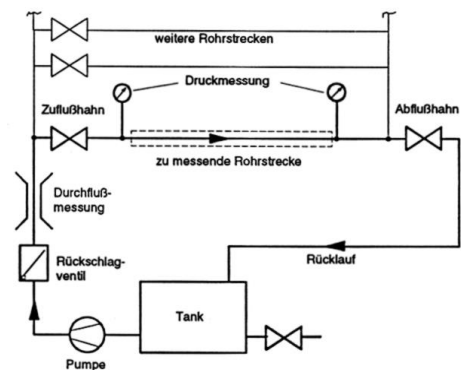


Abb. 5: Funktionsprinzip des Versuchsstandes

An den zu untersuchenden Rohrstrecken oder Bauteilen sind Druckmessstutzen angebracht, an denen der jeweils herrschende Gesamtdruck abgegriffen werden kann. Die Druckmessstutzen können mit Schlauch-Schnellkupplungen wahlweise mit Zweifachmanometern oder mit einem der beiden elektronischen Differenzdruckmesser verbunden werden. Die Manometer unterscheiden sich in ihren Messbereichen.

⁴ Das ½"-Stahlrohr hat einen Innendurchmesser von 16 mm.

Für die Untersuchung der laminaren Rohrströmung wird der Niederdruck-Differenzdruckmesser benutzt.

3.3. Entlüftung der Druckmessleitungen

Für genaue Druckmessungen ist es notwendig, dass alle Druckmessleitungen vollständig entlüftet werden. Dies ist nach Wechsel der zu messenden Rohrleitungen notwendig, da bei Wechsel des Druckmessstutzens immer Luft in die Druckmessleitungen strömt.

3.3.1. Niederdruck-Differenzdruckmesser am Teilversuchsstand 1

- Pumpe einschalten
- Stellventil schließen
- Sperrventil Hochdruckseite (Markierung H auf Stutzen) und Sperrventil Niederdruckseite (Markierung L auf Stutzen) öffnen
- beide Entlüftungshähne gleichzeitig öffnen, Messleitungen entlüften
- beide Entlüftungshähne gleichzeitig schließen
- Ausgleichsventil langsam schließen

3.3.2. Elektronischer Differenzdruckmesser und Zweifach-Manometer am Teilversuchsstand 2

- alle Zuflusshähne an den Rohrstrecken schließen
- Ablauf Rohrstrecken öffnen
- Pumpe ausschalten
- Manometer mit Verbindungsschläuchen an die zu messende Rohrstrecke anschließen
 👉 **Messstutzen der übrigen Rohrleitungen mit Blindstopfen verschließen!**
- Pumpe einschalten
- nur für Zweifach-Manometer: beide Ablaufventile unten öffnen
- nur für elektronisches Differenzdruckmessgerät: beide Entlüftungsventile öffnen
- Zuflusshahn der zu messenden Rohrstrecke *langsam* öffnen
- wenn keine Luftblasen mehr in der Messleitung sind, Ablauf Rohrstrecke schließen
- nur für Zweifach-Manometer: beide Ablaufventile unten langsam **gleichzeitig** schließen, so dass beide Wassersäulen gleichmäßig ansteigen und kein Überströmen zwischen beiden Messrohren auftritt
- nur für elektronisches Differenzdruckmessgerät: beide Entlüftungsventile schließen

3.4. Einstellen der Nulllage am Zweifach-Manometer

Die optimale Nulllage der Wassersäulen befindet sich in der Mitte der beiden Messrohre. Sie wird jeweils nach dem Entlüften eingestellt:

- Ablauf Rohrstrecke schließen, Pegel ist in beiden Messrohren gleich

- Pegel mit dem Entlüftungsventil auf Mitte der Skala einstellen, wobei der Pegel nur nach oben verstellt werden kann
- bei zu hohem Pegel: Zufluss Rohrstrecke schließen; Ablauf Rohrstrecke sowie Entlüftungsventil und beide Ablaufventile öffnen, Manometer läuft leer
- Entlüftungsventil schließen, Zufluss Rohrstrecke öffnen, beide Ablaufventile **gleichzeitig** schließen, Pegel einstellen

4. Versuchsdurchführung

1. Messen Sie die Raumtemperatur im Labor.
2. Untersuchung des effektiven hydraulischen Durchmessers einer verzinkten Stahlrohrleitung (Rohrleitung 8a) im laminaren Bereich am Teilversuchsstand 1
 - Schalten Sie die Pumpe ein und warten Sie, bis aus dem Überlauf des oberen Behälters Wasser austritt.
 - Entlüften Sie die Anlage gemäß Punkt 3.3.1.
 - Öffnen Sie vorsichtig das Stellventil (Druckpunkt beachten!) und stellen Sie näherungsweise die vorgegebenen Volumenströme (Tabelle 2) ein. Lesen Sie den mittleren Ausgangstrom des Niederdruck-Differenzdruckmessers für jeden Volumenstrom ab.
 - ☝ **Vermeiden Sie jegliche Berührung der Druckmessleitungen während der Messungen!**
 - Schließen Sie nach dem Teilversuch langsam das Sperrventil H. Öffnen Sie dann das Ausgleichsventil und schließen Sie anschließend langsam das Sperrventil L.
 - Schließen Sie das Stellventil und schalten Sie die Pumpe durch Ziehen des Netzsteckers aus
3. Untersuchung der Rohre gleichen Materials und unterschiedlichen Durchmessers (Rohrleitungen 2, 3, 4)
 - Verbinden Sie die Druckmessstellen der zu untersuchenden Rohrleitung mit einem Zweifachmanometer und entlüften Sie die Anlage gemäß Punkt 3.3.
 - Öffnen Sie das entsprechende Zuflussventil und stellen Sie am Abflussventil näherungsweise die vorgegebenen Richtvolumenströme (Tabelle 3) ein. Lesen Sie die entsprechenden Differenzdrücke ab.
4. Untersuchung der Rohre nahezu gleichen Durchmessers und unterschiedlichen Materials (Rohrleitungen 2, 7, 8)
 - Daten für die Rohrleitung 2 wurden bereits unter Punkt 4. 3 bestimmt. Für die Rohrleitung 7 verfahren Sie wie unter Punkt 4. 3. Für die Rohrleitung 8 ist der elektronische Differenzdruckmesser anzuwenden. Nutzen Sie Tabelle 4.

5. Untersuchung von Rohrbogen, Rohrwinkel und Rohrverengung (Rohrleitungen 1, 5)
- Verfahren Sie wie unter Punkt 4. 3 unter Anwendung von Tabelle 5 und Tabelle 6. Nutzen Sie zur Differenzdruckmessung bei der Rohrverengung jedoch den elektronischen Differenzdruckmesser.

5. Versuchsauswertung

1. Berechnen Sie die Viskosität des Wassers für die Raumtemperatur mit der in Abb. 8 angegebenen Gleichung unter Berücksichtigung der aktuellen, vom Luftdruck (siehe Versuch S2) abhängigen Siedetemperatur. Entnehmen Sie den Dichtewert für Wasser für die entsprechende Raumtemperatur aus Abb. 9.

2. Rohrleitung 8a - laminarer Bereich

Ermitteln Sie für die Rohrleitung 8 den effektiven Durchmesser auf der Grundlage des HAGEN-POISEUILLESchen Gesetzes (Gl. (6)) und vergleichen Sie diesen mit dem angegebenen Durchmesser. Überprüfen Sie die Laminarität anhand der REYNOLDSzahl.

3. Rohrleitungen 2, 3, 4:

Stellen Sie die Verläufe der Differenzdrücke in Abhängigkeit vom Volumenstrom für die drei verschiedenen Durchmesser in der Form $\Delta p(\dot{V})$ grafisch dar. Ermitteln Sie die λ -Werte für die Rohrleitungen und stellen Sie diese in Abhängigkeit von der REYNOLDSzahl in der Form $\lambda(Re)$ grafisch dar. Vergleichen Sie diese Werte mit den entsprechenden Werten aus dem Rohrreibungsdiagramm (Abb. 11).

4. Rohrleitungen 2, 7, 8:

Bestimmen Sie die entsprechenden λ -Werte im turbulenten Bereich unter Verwendung des im Punkt 2 für die Rohrleitungen 8 ermittelten bzw. für die Rohrleitung 7 gegebenen Durchmessers. Stellen Sie die Ergebnisse in einem Diagramm $\lambda(Re)$ dar. Überprüfen Sie die Ergebnisse für die Rohrleitungen 2 und 7 anhand der Beziehung von BLASIUS (Gl. (12)) für hydraulisch glatte Rohre und für die Rohrleitung 8 je nach Größe des Ausdruckes $Re^{7/8} \frac{k}{d}$ anhand der Beziehungen von COLEBROOK (Gl. (13)) für den Übergangsbereich bzw. NIKURADSE (Gl. (14)) für volle Rauigkeitsströmung.

5. Rohrleitung 8:

Ermitteln Sie die relativen Rauigkeiten k/d aus der Approximationsbeziehung für die voll ausgebildete Rauigkeitsströmung (Gl. (14)).

6. Rohrwinkel und Rohrbogen (Rohrleitung 1):

Bestimmen Sie die ζ -Werte für Rohrwinkel und Rohrbogen. Stellen Sie diese in Abhängigkeit von der REYNOLDSzahl dar ($\zeta(Re)$). Vergleichen Sie die experimentell ermittelten Werte mit dem Fall, dass die Längen der Bögen "abgewickelt" wurden. Berechnen Sie die Druck-

verlustbeiwerte ζ_{Kr} bzw. ζ_B für Rohrwinkel und Rohrbogen nach IDELSCHIK und vergleichen Sie diese mit den experimentell ermittelten Werten. Entnehmen Sie die erforderlichen Maße der Abb. 7.

7. Querschnittsänderungen (Rohrleitung 5):

Bestimmen Sie die ζ -Werte für die Querschnittsverringung und stellen Sie diese in Abhängigkeit von der REYNOLDSzahl grafisch dar ($\zeta(Re)$). Entnehmen Sie die erforderlichen Maße der Abb. 7. Vergleichen Sie diese mit den theoretischen Werten nach Gl. (21).

8. Führen Sie eine Fehlerbetrachtung bzgl. der Ermittlung der Verlustbeiwerte durch.

6. Literaturhinweise

- Spurk, J. H.; Aksel, N.: *Strömungslehre*, Springer-Verlag Berlin 2010
- Becker, E.: *Technische Strömungslehre*, B. G. Teubner Stuttgart 1993
- Albring, W.: *Angewandte Strömungslehre*, Akademie-Verlag Berlin 1970

7. Zusatzinformationen

Kupferrohre: $d_i = d_a - 2t$, t ...Wandstärke, d_i , d_a ...Innen- bzw. Außendurchmesser

Tabelle 1: Wandrauigkeiten der Rohre

Material	Oberfläche	k in mm
Cu	technisch glatt	0.001
PVC	technisch glatt	0.001
Stahl	verzinkt	0.100

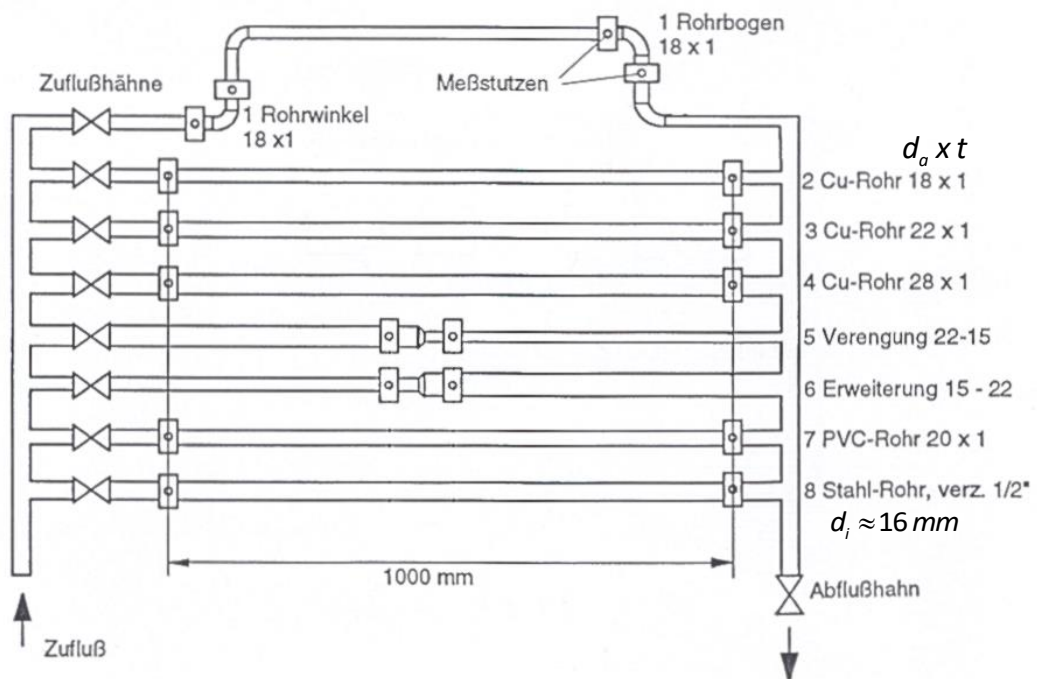


Abb. 6: Anordnung und Geometrie der Rohrstrecken am Teilversuchstand 2

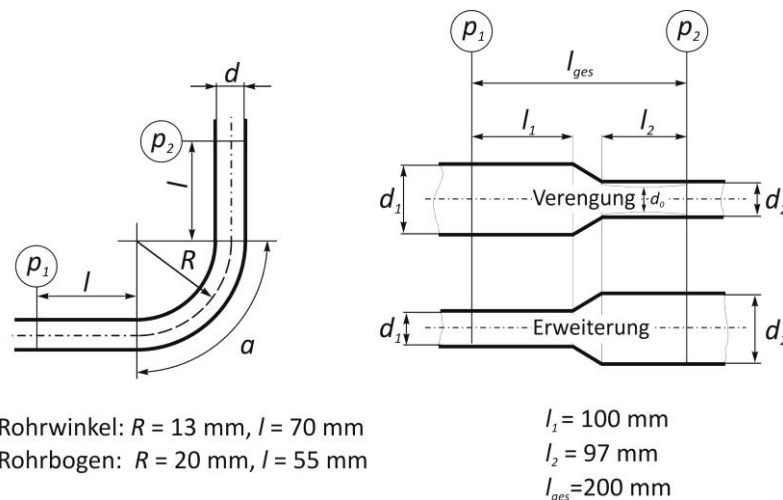


Abb. 7: Geometrie von Rohrwinkel, Rohrbogen, Querschnittsverengung und -erweiterung am Teilversuchsstand 2

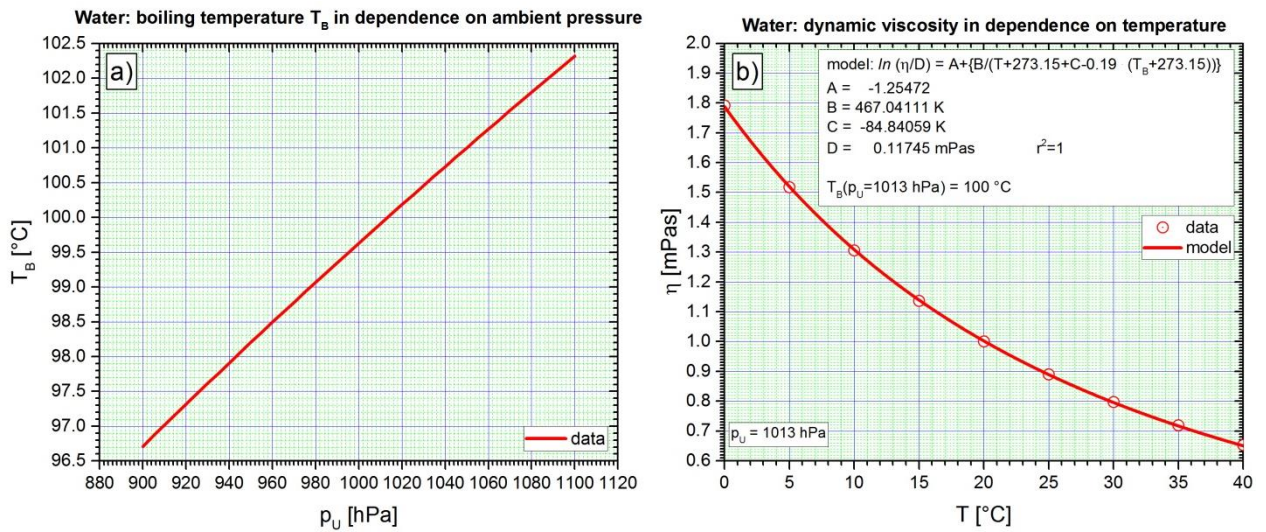


Abb. 8: Wasser - Siedetemperatur T_B in Abhängigkeit vom Umgebungsdruck p_U und dynamische Viskosität η in Abhängigkeit von der Temperatur

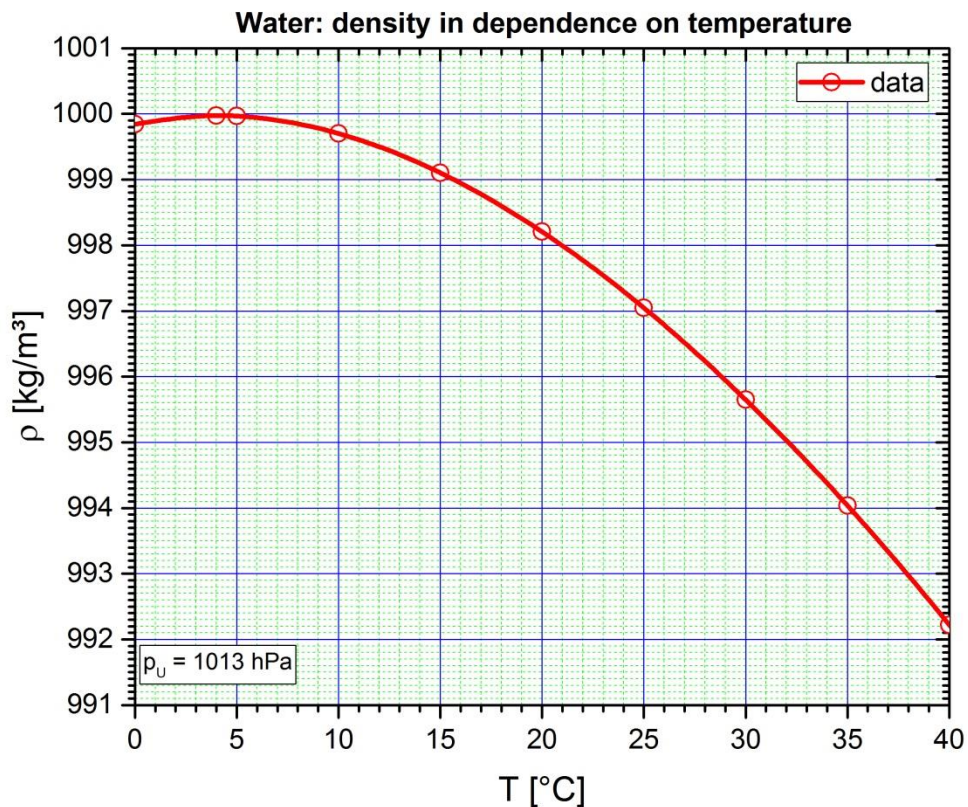


Abb. 9: Dichte von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur

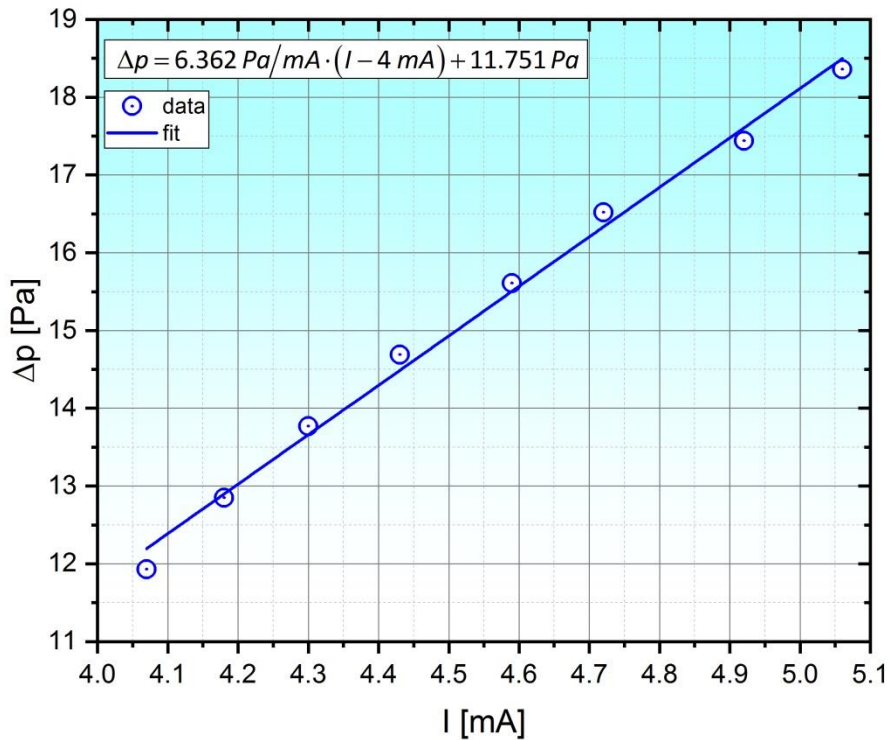


Abb. 10: Eichkurve des Niederdruck-Differenzdruckmessers

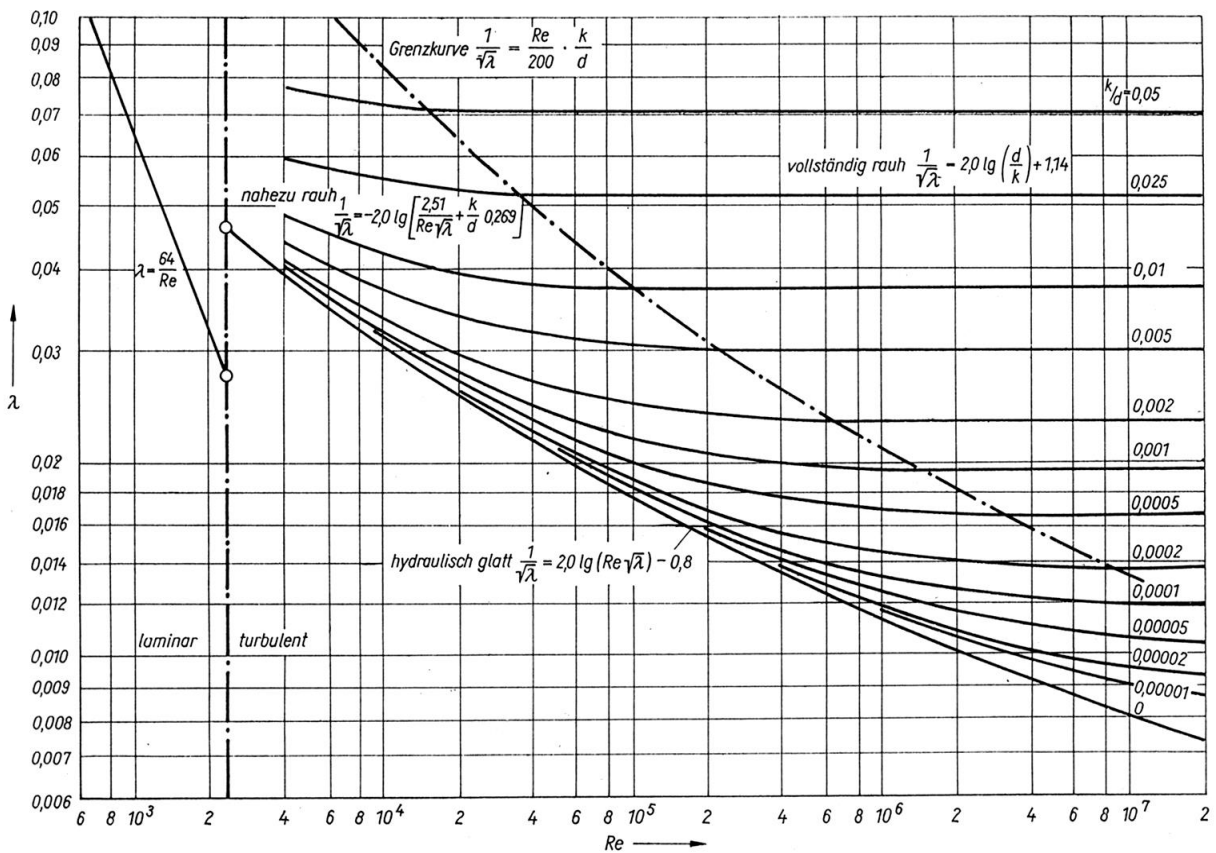


Abb. 11: Reibungsbeiwert λ für gerade Rohre in Abhängigkeit von der REYNOLDSzahl und der relativen Rauigkeit k/d

8. Messtabellen (Beispiele)

Tabelle 2 (Teilaufgabe 1): Ermittlung des effektiven Durchmessers der Rohrleitung 8 aus Messungen im laminaren Bereich (lt. Datenblatt $d_i = 16 \text{ mm}$)

$\dot{V}_R [l/h]$	Versuchsstand 1 Rohrleitung 8a (verzinkt) Abstand Druckmessstellen: _____ m	
	$\dot{V} [l/h]$	$I [mA]$
70		
75		
80		

Tabelle 3 (Teilaufgabe 2): Ermittlung der Rohrreibungsbeiwerte - gleiches Material, unterschiedliche Durchmesser

\dot{V}_R [% von 1960 l/h]	Rohrleitung 2		Rohrleitung 3		Rohrleitung 4	
	$\dot{V} [\%]$	$\Delta h [mm]$	$\dot{V} [\%]$	$\Delta h [mm]$	$\dot{V} [\%]$	$\Delta h [mm]$
10						
20						
40						
60						
70						
80						

Tabelle 4 (Teilaufgaben 3 und 4): Ermittlung der Rohrreibungsbeiwerte – nahezu gleicher Durchmesser, unterschiedliches Material

\dot{V}_R [% von 1960 l/h]	Rohrleitung 7		Rohrleitung 8	
	$\dot{V} [\%]$	$\Delta h [mm]$	$\dot{V} [\%]$	$\Delta p [mbar]$
10				
20				
40				
60				
70				
80				

Tabelle 5 (Teilaufgabe 5): Ermittlung der Druckverlustbeiwerte für Rohrwinkel und Rohrbogen

\dot{V}_R [% von 1960 l/h]	Rohrwinkel		Rohrbogen	
	\dot{V} [%]	Δh [mm]	\dot{V} [%]	Δh [mm]
10				
20				
40				
60				
70				
80				

Tabelle 6 (Teilaufgabe 6): Ermittlung der Druckverlustbeiwerte für Rohrverengung

\dot{V}_R [% von 1960 l/h]	Rohrverengung	
	\dot{V} [%]	Δp [mbar]
10		
20		
40		
60		
70		
80		