



Praktikum "Experimentelle Strömungsmechanik"

Versuch S5: Turbulente Luftströmung in berandeten Rohrleitungsbauteilen

Inhalt

1. Aufgabenstellung	2
2. Theoretische Grundlagen	2
2.1. Strömungsmechanische Grundlagen	2
2.1.1. Dimensionsanalytische Betrachtung von Strömungen in hydraulisch glatten Rohren	2
2.1.2. Druckverluste in Durchströmbauteilen	3
2.2. Messtechnische Grundlagen	5
2.2.1. Dichte und dynamische Viskosität der Luft	5
2.2.2. Druck- und Geschwindigkeitsmessung	6
2.2.2.1 Statischer Druck	6
2.2.2.2 Gesamtdruck und Strömungsgeschwindigkeit	7
2.2.2.3 Staudruck und Strömungsgeschwindigkeit	7
2.2.3. Volumenstrom	8
3. Versuchsaufbau	9
3.1. Untersuchung des turbulenten Geschwindigkeitsprofils	10
3.2. Untersuchung von Rohrkrümmern	10
4. Versuchsdurchführung	10
4.1. Luftdruck und Temperatur	10
4.2. Turbulentes Geschwindigkeitsprofil	10
4.3. Druckverluste in Rohrkrümmern	11
5. Versuchsauswertung	11
5.1. Dichte der Luft	11
5.2. Turbulentes Geschwindigkeitsprofil	12
5.3. Druckverluste in Rohrkrümmern	12
6. Literatur	12
7. Grafiken	13
8. Tabellen	15

1. Aufgabenstellung

- Bestimmen Sie die radialen Druck- bzw. Geschwindigkeitsverteilungen einer turbulenten Luftströmung im Rohr.
- Bestimmen Sie die Druckverlustbeiwerte für verschiedene Rohrkrümmer.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Strömungsmechanische Grundlagen

2.1.1. Dimensionsanalytische Betrachtung von Strömungen in hydraulisch glatten Rohren

In technischen Anlagen, aber auch in der Natur, beobachtet man sehr häufig stark durchwirbelte Strömungen, in denen die Geschwindigkeiten unregelmäßigen zeitlichen und örtlichen Schwankungen unterworfen sind. Diese turbulenten Strömungen treten immer dann auf, wenn die durch die Viskosität verursachten Schubspannungen nicht mehr ausreichen, entstehende oder aufgeprägte Störungen zu dämpfen. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass der Grundströmung Wirbel verschiedener Abmessungen und Richtungen überlagert sind.

Ein Vergleich der Geschwindigkeitsprofile in Abb. 1 zeigt, dass bei laminarer Strömung im kreisrunden Rohr (vgl. Versuch S2: Untersuchung des Übergangs von laminarer zu turbulenter Strömung) ein parabolisches Profil vorliegt, während das turbulente Profil in Rohrmitte deutlich abgeflacht ist, die Gradienten an der Wand also deutlich höher sind.

Von praktischer Relevanz ist der Druckverlust, der bei der Durchströmung einer Rohrleitung auftritt. Um Gleichungen zur Berechnung des Druckverlustes in Abhängigkeit vom Strömungstyp zu entwickeln, gehen wir von einer Kräftebilanz an einem in der Rohrleitung strömenden zylindrischen Partikel aus.

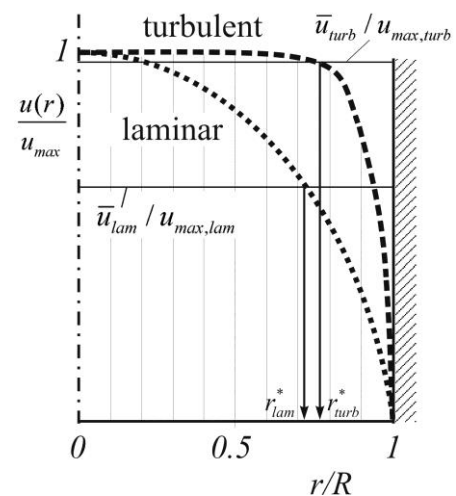


Abb. 1: Vergleich der Geschwindigkeitsfelder von laminarer und turbulenter Rohrströmung

$$\underbrace{\sigma \cdot 2\pi r l}_{\text{Scherkraft}} = \underbrace{\Delta p \cdot \pi r^2}_{\text{Druckkraft}} \quad (1)$$

Wir erhalten hieraus die Scherspannungsverteilung im Rohr bzw. den Scherspannungswert an der Rohrwand ($R = d/2$):

$$\sigma(r) = \frac{\Delta p r}{2l} \quad \text{bzw. an der Wand} \quad \sigma(R) = \sigma_w = \frac{\Delta p R}{2l} = \frac{\Delta p d}{4l} \quad (2)$$

Es sind r und l der Radius und die Länge des Flüssigkeitszylinders sowie Δp bzw. σ der Druckabfall über der Zylinderlänge bzw. die Schubspannung an der Zylindermantelfläche.

Das Fluid (Dichte ρ_F , dynamische Viskosität η_F) ströme durch ein **hydraulisch glattes Rohr** des Durchmessers d und der Länge l mit der mittleren Geschwindigkeit \bar{u} . Die Größe $\rho_F \bar{u}^2 / 2$ wird als dynamischer Druck oder Staudruck bezeichnet und hat die Dimension Kraft/Länge². Bezieht

man den Druckabfall Δp über der Länge l der Rohrleitung mit dem Durchmesser d auf diesen dynamischen Druck, erhält man eine dimensionslose Zahl (EULERzahl)

$$Eu = \frac{\Delta p}{\frac{\rho_F}{2} \bar{u}^2} = \Phi(\rho_F, \eta_F, \bar{u}, d, l) \quad (3)$$

Der Druckabfall ist proportional zur Länge der Rohrleitung. Somit kann die Funktion Φ in dimensionsloser Form als

$$\Phi = \frac{l}{d} \lambda(\rho_F, \eta_F, \bar{u}, d) \quad (4)$$

dargestellt werden. λ hängt wegen der Proportionalität des Druckabfalls zur Rohrlänge nicht mehr von l , sondern nur noch von den vier angegebenen Größen ab. Die einzige dimensionslose Kombination dieser vier Größen ist die REYNOLDSzahl¹

$$Re = \frac{\rho_F \bar{u} d}{\eta_F} \quad (5)$$

Somit ergibt sich für die als *Rohrreibungsbeiwert* bezeichnete Funktion: $\lambda = \lambda(Re)$.
Aus den Gleichungen (3) und (4) folgt sofort für den Druckabfall in der Rohrleitung

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho_F}{2} \bar{u}^2 \quad (6)$$

Einsetzen von (6) in (2) führt zu

$$\sigma = \lambda \frac{\rho_F}{8} \bar{u}^2 \quad (7)$$

Im laminaren Fall, wo sich ein der Geschwindigkeit proportionaler Verlust einstellt, weist der Rohrreibungsbeiwert λ eine starke Abhängigkeit von Re auf:

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

Im turbulenten Fall können wir den Rohrreibungsbeiwert λ in Abhängigkeit von der mittleren REYNOLDSzahl für hydraulisch glatte Rohre mit dem BLASIUSschen Gesetz beschreiben:

$$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (9)$$

2.1.2. Druckverluste in Durchströmbauteilen

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

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

Für die Ermittlung technisch relevanter integraler Größen wird deshalb ein einfaches, quasi-eindimensionales Berechnungsmodell, das *Stromfadenmodell*, angewendet. Beim Stromfaden-

¹ vgl. Becker, E. Technische Strömungslehre, S. 114ff.

modell 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 Energiebilanz (BERNOULLI-Gleichung mit Verlustterm)

$$\underbrace{p_E - p_A}_{\text{statischer Druck}} + \underbrace{\frac{\rho_F}{2}(\bar{u}_E^2 - \bar{u}_A^2)}_{\text{kinetische Energie}} + \underbrace{\rho_F g(\bar{z}_E - \bar{z}_A)}_{\text{potentielle Energie}} = \Delta p_V \quad (10)$$

Die \bar{z}_i sind hierbei die statischen Höhen von Ein- (E) bzw. Austritt (A). 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 nur experimentell bestimmt werden.

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

$$\Delta p_V = \zeta \frac{\rho_F}{2} \bar{u}^2 \quad (11)$$

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

$$Re = \frac{\rho_F \bar{u} d}{\eta_F} \quad (12)$$

abhängt. Hierbei sind η_F bzw. d die dynamische Viskosität des Fluids bzw. der (gleichwertige²) Durchmesser des Strömungsgebietes.

Für die Reihenschaltung von Einzelbauteilen (Rohrleitungen, Krümmer, Querschnittsänderungen) addieren sich die Verlustfaktoren:

$$\Delta p_{V,ges} = \sum_i \zeta_i \frac{\rho_F}{2} \bar{u}_i^2 \quad (13)$$

In Rohren mit konstantem Durchmesser und bei ausgebildeter Strömung sind die Verluste proportional zur Länge l und indirekt proportional zum Durchmesser d :

$$\Delta p_V = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho_F}{2} \bar{u}^2 \quad (14)$$

Hierbei ist $\lambda = \zeta_{Rohr} \frac{d}{l}$ der *Rohrreibungsbeiwert* oder *Widerstandszahl*. Gl. (14) findet auch in den Versuchen S2 (Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung) und S3 (Strömung in Rohrleitungen und Rohrleitungsbauteilen) Anwendung.

² Der gleichwertige Durchmesser $d_{gl} = 4A/U$ wird bei Strömungsgebieten mit nicht-kreisförmigem Querschnitt der Querschnittsfläche A und des Umfanges U benutzt.

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. Der Druckverlust in einem Krümmer setzt sich nach Gl. (13) additiv aus dem Beitrag der "abgewinkelten" Rohrlänge und dem Beitrag durch die Richtungsänderung zusammen:

$$\Delta p_v = \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta_j \right) \frac{\rho_F \bar{u}^2}{2}, \quad j = B, S, W \quad (15)$$

Speziell für den Rohrbogen (B) mit dem Umlenkwinkel α° ist

$$l = \pi R \frac{\alpha^\circ}{180^\circ} \quad (16)$$

Der Druckverlustbeiwert ζ_B für Rohrbögen wird experimentell bestimmt oder mit Näherungsformeln (z. B. nach IDELSCHIK) berechnet:

$$\zeta_B = \frac{C_\alpha C_{Re} C_k C_Q}{\sqrt{R/d}} \quad (17)$$

Es bedeuten: $R = 0.095 \text{ m}$

Krümmungsradius des Rohrbogens

$$C_\alpha = 0.21$$

Umlenkbeiwert für 90°-Bogen

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

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

$$C_Q = 1$$

Querschnittsbeiwert

Für zusammengesetzte Krümmer wurde experimentell für $\text{Re} > 10^5$ und glatte Rohre erhalten:

$$\text{Rohrwinkel (W):} \quad \zeta_W = 1.13 \quad (18)$$

$$\text{Stückbogen (3 Nähte, S):} \quad \zeta_S = 0.25 \quad (19)$$

2.2. Messtechnische Grundlagen

2.2.1. Dichte und dynamische Viskosität der Luft

Die Dichte der Luft ρ_F wird aus den aktuellen Werten des barometrischen Luftdrucks p_b (Pa), der aktuellen Lufttemperatur T_L ($^\circ\text{C}$) und der Gaskonstanten für feuchte Luft R_{ha} nach der Gleichung

$$\rho_F = \frac{p_b}{R_{ha} \cdot (T_L + 273.15^\circ\text{C})} \quad (20)$$

berechnet. Die Gaskonstante R_{ha} erhalten wir aus der Gleichung

$$R_{ha} = \frac{R_{da}}{1 - \left(\frac{\varphi \cdot p_{sat}}{p_b} \right) \cdot \left(1 - \frac{R_{da}}{R_v} \right)} \quad (21)$$

Hierin sind die Gaskonstante für Wasserdampf $R_v = 461.523 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, die Gaskonstante für trockene Luft $R_{da} = 287.058 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, die relative Feuchte der Luft φ (dezimal), und der Sättigungsdampfdruck des Wassers p_{sat} . Der Sättigungsdampfdruck von Wasser in Luft wird mit Hilfe der Magnus-Formel berechnet, die ausreichend genaue Ergebnisse für die vorliegenden Bedingungen liefert:

$$p_{sat} = k_1 \cdot e^{\frac{k_2 T_L}{k_3 + T_L}} \quad (22)$$

Die darin auftretenden Konstanten haben die Werte $k_1 = 611.2 \text{ Pa}$, $k_2 = 17.62$ und $k_3 = 243.12 \text{ }^\circ\text{C}$. In den Gleichungen (20) - (22) sind der barometrische Luftdruck in Pa und die Lufttemperatur in $^\circ\text{C}$ einzusetzen. Der aktuelle Luftdruck ist am LAMBRECHT-Barometer (Raum C 2.06), die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit am Messinstrument im Raum C 2.31 abzulesen.

Die dynamische Viskosität der Luft hat unter Normalbedingungen (20°C , Normaldruck) einen Wert von $\eta_L = 1.818 \cdot 10^{-5} \text{ Pas}$.

2.2.2. Druck- und Geschwindigkeitsmessung

Drücke und Geschwindigkeiten in Strömungen werden mit verschiedenen Sonden gemessen. Die Art der Sonde hängt von der Art des zu messenden Druckes (statischer Druck, Staudruck, Gesamtdruck) bzw. der zu messenden Geschwindigkeit (mittlere Geschwindigkeit, lokale Geschwindigkeit, Größe der Geschwindigkeit usw.) ab. Für die Messung von Volumenströmen werden standardisierte Düsen oder Blenden verwendet.

2.2.2.1 Statischer Druck

Die Messung des statischen Druckes erfolgt mit Wandbohrungen in geschlossenen Kanälen bzw. mit Sonden, die *senkrecht* zur Strömungsrichtung Bohrungen oder Schlitze besitzen. Für den statischen Druck erhalten wir mit den Bezeichnungen in Abb. 2 die Beziehung

$$\begin{aligned} p_{statisch} &= p - p_b \\ &= g [\rho_{sp} \Delta h - \rho_F (h_0 + h_2)] \\ &= g [(\rho_{sp} - \rho_F) \Delta h - \rho_F (h_0 - h_1)] \\ &= \rho_{sp} g \left[\left(1 - \frac{\rho_F}{\rho_{sp}} \right) \Delta h - \frac{\rho_F}{\rho_{sp}} (h_0 - h_1) \right] \end{aligned} \quad (23)$$

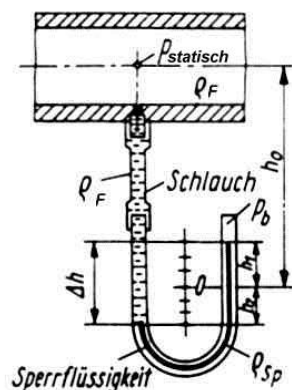


Abb. 2: Messung des statischen Druckes

Zu beachten ist, dass bei Anordnung des Manometers um h_0 unterhalb der Rohrachse ein um $p = \rho_F g h_0$ zu hoher Druck gemessen wird. p_b ist der barometri-

sche Druck.

Da mit Luft als strömendem Fluid gearbeitet wird und die Dichte der Luft wesentlich kleiner als die Dichte der Sperrflüssigkeit ρ_{sp} (Silikonöl, $\rho_F/\rho_{sp} \ll 1$) ist, vereinfacht sich Gl. (23) für den statischen Druck in der Rohrleitung:

$$p_{statisch} = \rho_{sp} g \Delta h \quad (24)$$

Wird ein Schrägrohrmanometer mit dem Neigungswinkel β benutzt und eine Differenz der Flüssigkeitssäulenlängen Δh^* gemessen, muss dies berücksichtigt werden:

$$\Delta h = \Delta h^* \cdot \sin \beta \quad (25)$$

2.2.2.2 Gesamtdruck und Strömungsgeschwindigkeit

Mit einem Staurohr (PITOT-Rohr) können wir den *Gesamtdruck*, der sich aus dem *statischen Druck* und dem *Staudruck* zusammensetzt, messen. Ein Rohr wird gemäß Abb. 3 mit seiner Öffnung entgegen der Anströmrichtung in der Strömung angeordnet. Das Fluid staut sich wegen der in einem Manometer befindlichen Sperrflüssigkeit in der Öffnung des PITOT-Rohres. In einiger Entfernung vor dem Rohr herrschen die ungestörte lokale Geschwindigkeit u und der Druck p . Bis zur Öffnung des Rohres wird die Geschwindigkeit auf den Wert Null verzögert. Hierdurch kommt es entsprechend der BERNOULLI-Gleichung zu einem Druckanstieg $\rho_F u^2 / 2$, da die kinetische Energie der Strömung verlustfrei in Druckenergie umgesetzt wird. Der in der Öffnung des PITOT-Rohres vorhandene Gesamtdruck ist somit

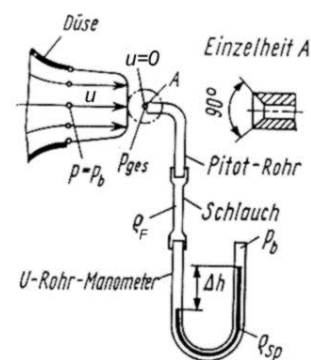


Abb. 3: Messung des Gesamtdruckes mittels eines PITOT-Rohres

$$p_{ges} = p_b + \frac{\rho_F}{2} u^2 \quad (26)$$

Der statische Druck entspricht in diesem Fall dem barometrischen Druck p_b . Hieraus erhalten wir eine Beziehung zur Berechnung der lokalen mittleren Strömungsgeschwindigkeit:

$$u = \sqrt{2 \frac{p_{ges} - p_b}{\rho_F}} = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho_F}} \quad (27)$$

2.2.2.3 Staudruck und Strömungsgeschwindigkeit

Werden die beiden Methoden zur Messung des statischen und Gesamtdruckes kombiniert, ist man in der Lage, den Staudruck zu messen. Im Gegensatz zur Messung des statischen Druckes ist die Lage des Manometers bezüglich des Messortes ohne Belang, da beide Messleitungen mit dem gleichen Fluid gefüllt sind.

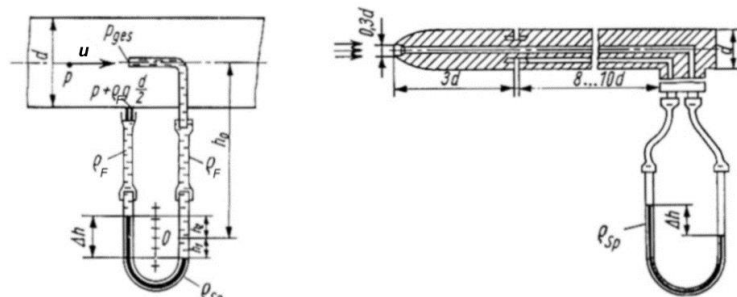


Abb. 4: Prinzip einer Staudruckmessung und technische Ausführung eines Staurohres (PRANDTL-Rohr)

Mit den Bezeichnungen aus Abb. 4 folgt für den Druck in der Höhe des rechten Meniskus der Sperrflüssigkeit im Gleichgewicht

$$\underbrace{p + \rho_F g(h_0 - h_2) + \rho_{Sp} g(h_1 + h_2)}_{\text{linke Säule}} = \underbrace{p_{ges} + \rho_F g(h_0 + h_1)}_{\text{rechte Säule}} \quad (28)$$

Mit Gl. (26) und p als dem Druck im zu messenden Fluid sowie $\Delta h = h_1 + h_2$ erhalten wir

$$\frac{\rho_F}{2} u^2 = p_{ges} - p = (\rho_{Sp} - \rho_F) g \Delta h \quad (29)$$

bzw. für die lokale mittlere Geschwindigkeit

$$u = \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{\rho_{Sp}}{\rho_F} - 1 \right)} \quad (30)$$

Für experimentelle Zwecke wird das PRANDTLsche Staurohr (Abb. 4 rechts) verwendet. Wird ein Schrägrohrmanometer mit dem Neigungswinkel β benutzt und eine Differenz der Flüssigkeitssäulenlängen Δh^* gemessen, muss dies berücksichtigt werden:

$$\Delta h = \Delta h^* \cdot \sin\beta \quad (25)$$

2.2.3. Volumenstrom

Die Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den Drücken und Geschwindigkeiten in einer Strömung inkompressibler Fluide lassen sich zur Messung des Volumenstromes anwenden. Bei Strömungen in Rohren existiert immer eine radiale Position r_m , an der die mittlere Geschwindigkeit \bar{u} einer Geschwindigkeit $u(r_m)$ entspricht. Positioniert man an dieser Stelle einen Geschwindigkeitssensor, so lässt sich aus der Beziehung

$$\dot{V} = \bar{u} A = \int_A u dA \quad (31)$$

der Volumenstrom \dot{V} bei bekannter Querschnittsfläche des Strömungsgebietes berechnen. Da die genaue Stelle bei turbulenten Strömungen nicht exakt bekannt ist, werden zur Volumenstrommessung Düsen oder Blenden mit standardisierten Abmessungen (Abb. 5) eingesetzt, die den Strömungsquerschnitt definieren verengen und somit zu einem Druckabfall führen, aus dem dann der Volumenstrom berechnet werden kann³. Aus der Bernoulli-Gleichung lässt sich unter Beachtung einer möglichen Einschnürung des Strahles nach Passieren der Verengung die Beziehung

$$\dot{V} = \alpha \varepsilon A_V \sqrt{\frac{2}{\rho_F} \Delta p} \quad (32)$$

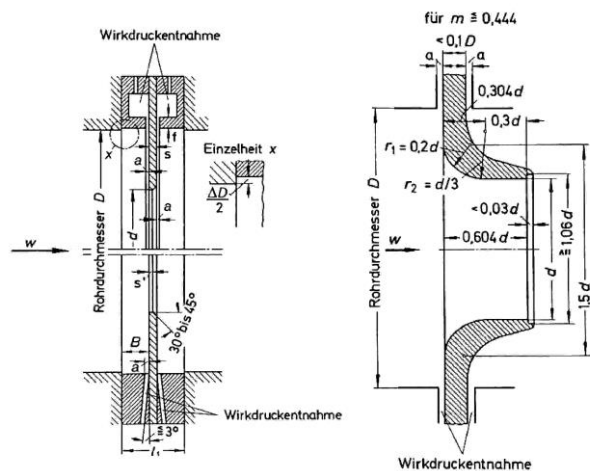


Abb. 5: Messblende und **Messdüse** (nach ISO 5167-2 und ISO 5167-3)

³ Näheres zur Theorie findet man in der angegebenen Literatur.

herleiten. Hierin sind α die Durchflusszahl, ε die Expansionszahl (Berücksichtigung von Kompressibilitätseffekten bzw. Dichteänderungen), A_V die Querschnittsfläche der Verengung, ρ_F

die Dichte des Fluids und $\Delta p = \rho_{sp} \left(1 - \frac{\rho_F}{\rho_{sp}} \right)^{\ll 1} g \Delta h^* \sin \beta = \rho_{sp} g \Delta h^* \sin \beta$ der gemessene Druckabfall über der Verengung.

Für den speziellen Fall sind eine Standardmessdüse (D) und eine Standardmessblende (B) mit folgenden Daten (nach ISO 5167-2:2003 und ISO 5167-3:2003 - früher DIN 1952) gegeben:

$$\alpha_D = 1.1377, \varepsilon_D = 0.9370, d_D = 50 \text{ mm}$$

$$\alpha_B = 0.7588, \varepsilon_B = 0.9795, d_B = 50 \text{ mm}$$

Im Versuch wird die **Standardmessdüse** eingesetzt.

3. Versuchsaufbau

Der Versuch wird am Versuchsstand "Luftströmungen" durchgeführt (Abb. 7 auf S. 13). Es sind

- Untersuchungen der turbulenten Luftströmung in einem Rohr
- Untersuchungen zu Druckverlusten an Rohrleitungsbauteilen

möglich.

Der Versuchsstand besteht aus einem Gestell, auf welchem sich ein Radiallüfter (1) befindet. Ein Gitter an der Druckseite des Radiallüfters verhindert eine ungewollte Berührung des rotierenden Lüfterrades. An der Saugseite des Lüfters ist die Rohrleitung (4) angeschlossen. Des Weiteren gehört zum Versuchsstand ein 16-fach-Schrägrohr-Manometer (6) zur Messung der Drücke. Der Messbereich des 16-fach-Manometers kann durch Änderung des Neigungswinkels im Verhältnis 1:n (n=1, 2, 5, 10) variiert werden. Die entsprechende Höhendifferenz beider Flüssigkeitsschenkel muss durch n geteilt werden, um die auf die senkrechte Stellung der Manometerrohre bezogene Höhe zu berechnen. Mit Hilfe einer Irisblende (7), deren Strömungsquerschnitt einstellbar ist und die sich am Lufteintritt der Saugstrecke befindet, kann der Volumenstrom in gewissen Grenzen eingestellt werden, so dass sich verschiedene Geschwindigkeits- und Druckverteilungen sowohl über dem Strömungsquerschnitt wie auch entlang der Saugstrecke ergeben. Am Eintritt der Saugstrecke können verschiedene, hinsichtlich ihrer Druckverluste zu untersuchende Rohrkrümmer oder -bögen (8) befestigt werden. Am Eintritt der Rohrkrümmer bzw. -bögen ist ein Acrylrohr (9) befestigt, welches die Ausbildung eines ungestörten turbulenten Geschwindigkeitsprofils gewährleisten soll. Ein PITOT-Rohreinsatz (3) gestattet die Messung des radialen Geschwindigkeitsprofils. Darüber hinaus sind in die Saugstrecke verschiedene Querschnittserweiterungen eingebaut. Der Volumenstrom kann mit Hilfe einer Normdüse oder Normblende (5) aus einer Differenzdruckmessung ermittelt werden. Zur Messung der statischen Drücke ist die Rohrleitung mit verschiedenen Druckmessstellen versehen, die durch Schläuche mit dem 16-fach-Manometer verbunden werden können.

Der Radiallüfter wird am Schalter (2) ein- und ausgeschaltet. Um den Lüfter im Notfall schnell ausschalten zu können, befindet sich neben dem Schalter eine Not-Aus-Taste.

3.1. Untersuchung des turbulenten Geschwindigkeitsprofils

Mit der Messeinrichtung für Geschwindigkeitsprofile (Abb. 6) ist es möglich, das Druck- bzw. Geschwindigkeitsfeld in der Rohrleitung zu messen. Durch eine abgedichtete Öffnung in der Rohrwand eines Acrylglas-Abschnittes der Rohrleitung wird ein PITOT-Rohr in die Strömung eingebracht. Der an der Öffnung des PITOT-Rohres auftretende Gesamtdruck ist ein Maß für die an dieser Position vorhandene Geschwindigkeit. Das PITOT-Rohr ist radial verschiebbar gelagert und kann an der jeweiligen Position mit einer Rändelschraube arretiert werden. An der Führung ist eine mm-Skala angebracht, an der die Position des PITOT-Rohres in radialer Richtung abgelesen werden kann.

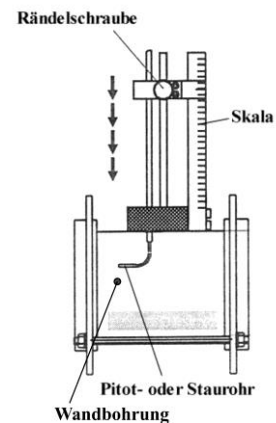


Abb. 6: Messeinrichtung für Geschwindigkeitsprofil

Das PITOT-Rohr ist zur Messung des Gesamtdruckes mit einem Manometerrohr einer 16-fach-Manometerbatterie (Teil (6) in Abb. 7) verbunden. Um den statischen Druck an der Stelle der Geschwindigkeitsmessung zu ermitteln, wird eine Wandbohrung benutzt, die sich auf Höhe des Pitot-Rohres befindet und mit einem benachbarten Schenkel in der Manometerbatterie verbunden.

3.2. Untersuchung von Rohrkrümmern

Durch Messung der statischen Drücke ist es möglich, die Druckänderungen, die durch die Strömung im Rohr oder durch Einbauten wie Krümmern oder Querschnittsänderungen entstehen, in Abhängigkeit vom Volumenstrom zu ermitteln. In Abb. 8 auf S. 13 ist die Anordnung der Druckmessstellen in der Saugstrecke der Versuchsanlage dargestellt.

Um den Einfluss von Einlaufeffekten zu eliminieren, ist am Krümmereintritt ein Acrylglasrohr befestigt, in dem sich das turbulente Geschwindigkeitsprofil ausbilden kann. Die unmittelbar am Krümmer befindlichen Messstellen (5) in Abb. 9 auf S. 14 werden mit einer Ringleitung verbunden. Die beiden Ringleitungen werden mit zwei nebeneinander liegenden Manometerrohren verbunden, so dass die entsprechende Druckdifferenz ermittelt werden kann.

Der Volumenstrom wird mit der Irisblende (7) eingestellt und mit der Messdüse nach Abschnitt 2.2.3. gemessen. Mit Gl. (11) kann unter Berücksichtigung der mittleren Geschwindigkeit nach Gl. (31) bei bekanntem Volumenstrom und bekannter Dichte der Luft der Druckverlustbeiwert des Krümmers berechnet werden.

Die Krümmern können nach Lösen der jeweils vier Schrauben entfernt bzw. ausgetauscht werden.

4. Versuchsdurchführung

4.1. Luftdruck, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit

Lesen Sie den aktuellen Luftdruck p_b am LAMBRECHT-Barometer (Raum C 2.06) und die aktuelle Lufttemperatur T_L sowie die relative Luftfeuchtigkeit φ am Messinstrument im Raum C 2.08 ab.

4.2. Turbulentes Geschwindigkeitsprofil

1. Stellen Sie die Iris-Blende auf Position 6.

2. Verbinden Sie das PITOT-Rohr (p_{ges}) und die zugehörige Messstelle für den statischen Druck ($p_{statisch}$) mit zwei nebeneinander liegenden Manometerrohren des 16-fach-Manometers. Verbinden Sie die Messstutzen der Messdüse mit zwei nebeneinander liegenden Manometerrohren des 16-fach-Manometers
3. Stellen Sie die Neigung des 16-fach-Manometers auf 1:5 und eine Flüssigkeitssäulenlänge von ca. 9 cm ein. Schalten Sie den Lüfter, gedrosselt mit der Lochblende, ein. Beobachten Sie dabei die Flüssigkeitssäulen im Manometer.
 - ☞ Ein Eindringen von Sperrflüssigkeit in die PVC-Schläuche ist zu vermeiden. Vergrößern Sie ggf. die Neigung des Manometerblockes.
4. Positionieren Sie das PITOT-Rohr, beginnend an der unteren oder oberen Rohrwand, entsprechend Tabelle 1⁴ und messen Sie jeweils die Druckdifferenz $\Delta p_G = p_{ges} - p_{statisch}$. Wiederholen Sie die Messungen jeweils dreimal. Ändern Sie gegebenenfalls die Neigung des Manometerblocks.
5. Schalten Sie nach der Messung den Lüfter aus.

4.3. Druckverluste in Rohrkrümmern

1. Messen Sie die Rohrkrümmer vor dem Versuch geometrisch hinsichtlich R , d und l aus.
2. Montieren Sie den Rohrbogen am Einlass der Saugstrecke und das Acrylrohr am Krümmereintritt (Eintrittsöffnung ist oben!).
3. Stellen Sie die IRIS-Blende auf Stellung 1.
4. Verbinden Sie die entsprechenden Druckmessstellen am Krümmer mit den Manometerrohren.
5. Stellen Sie die Neigung des 16-fach-Manometers auf 11.5° (Neigung 1:5) ein und justieren Sie die Höhe der Flüssigkeitssäulen so, dass sie eine Länge von etwa 9 cm haben. Schalten Sie den Lüfter, gedrosselt mit der Lochblende, ein. Beobachten Sie dabei die Flüssigkeitssäulen im Manometer.
 - ☞ Ein Eindringen von Sperrflüssigkeit in die PVC-Schläuche ist zu vermeiden. Vergrößern Sie ggf. die Neigung des Manometerblockes.
6. Messen Sie jeweils den Druckabfall am Krümmer und an der Messdüse. Variieren Sie nach jeder Messung den Volumenstrom mit der Iris-Blende.
7. Wechseln Sie den Krümmer und wiederholen Sie die Messungen ab Punkt 3.
8. Entfernen Sie am Ende des Teilversuches den Krümmer und schalten Sie den Lüfter aus.

5. Versuchsauswertung

5.1. Dichte der Luft

Berechnen Sie aus den aktuellen Werten des Luftdruckes p_b der Lufttemperatur T_L und der relativen Luftfeuchtigkeit φ die Luftdichte ρ_F mit den Gln. (20) und (21).

⁴ Die Angabe s bezieht sich auf den Abstand des PITOT-Rohres von der oberen Rohrwand.

5.2. Turbulentes Geschwindigkeitsprofil

1. Berechnen Sie aus den gemessenen Staudrücken das Geschwindigkeitsprofil. Stellen Sie das radiale Geschwindigkeitsprofil grafisch dar.
2. Bestimmen Sie durch näherungsweise numerische Integration⁵ des Geschwindigkeitsprofils den Volumenstrom und vergleichen Sie diesen mit dem Volumenstrom aus der Messung mit der Standarddüse. Diskutieren Sie eventuelle Abweichungen.
3. Bestimmen Sie näherungsweise die Stelle $r = r_m$, an der die Geschwindigkeit $u(r)$ gerade der mittleren Geschwindigkeit \bar{u} der Strömung entspricht und geben Sie diese Stelle prozentual auf den Rohrradius bezogen an.

5.3. Druckverluste in Rohrkrümmern

1. Stellen Sie die Kennlinie $\Delta p = f(\dot{V})$ für die verschiedenen Rohrkrümmern grafisch dar und interpretieren Sie die Kurven. Welche Aussagen können hieraus für die Auslegung von Rohrleitungen getroffen werden.
2. Berechnen Sie den Gesamtdruckverlustbeiwert für die Rohrkrümmern nach Gl. (15). Nutzen Sie zur Ermittlung des Rohrreibungsbeiwertes λ die Abb. 10 unter der Annahme einer Wandrauigkeit des Rohres von $k = 1.6 \mu\text{m}$ (technisch glatt). Vergleichen Sie die so ermittelten Werte mit den nach den Gln. (17) bis (19) erhaltenen Werten. Diskutieren Sie eventuelle Abweichungen.

6. Literatur

- Spurk, J. H.; Aksel, N.: Strömungslehre (8. Auflage), Springer-Verlag, 2010
- Becker, E., Technische Strömungslehre, Teubner, 1993
- Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 19. Auflage

⁵ Allgemein gilt $\dot{V} = \int_A \vec{u} \cdot \vec{n} dA$. Das Rohr hat einen kreisförmigen Querschnitt $A = \pi R^2$ bzw. $dA = 2\pi r dr$. Wir erhalten

$\dot{V} = 2\pi \int_0^R u(r) r dr$ bzw. in diskretisierter Form $\dot{V} \approx 2\pi \cdot \sum_i u_i(r_i) r_i \Delta r_i$ als Berechnungsvorschrift für die näherungsweise Integration

über die n Stützstellen. Die Berechnung führen wir jeweils für die Obersumme $s_o = \sum_{i=1}^{n-1} u_{i+1} \cdot r_{i+1} (r_{i+1} - r_i)$ und Untersumme

$s_u = \sum_{i=1}^{n-1} u_i \cdot r_i \cdot (r_{i+1} - r_i)$ durch und erhalten als Näherung $\dot{V} = 2\pi \left(s_o + \frac{1}{2} (s_o - s_u) \right) = \pi (s_o + s_u)$.

7. Grafiken

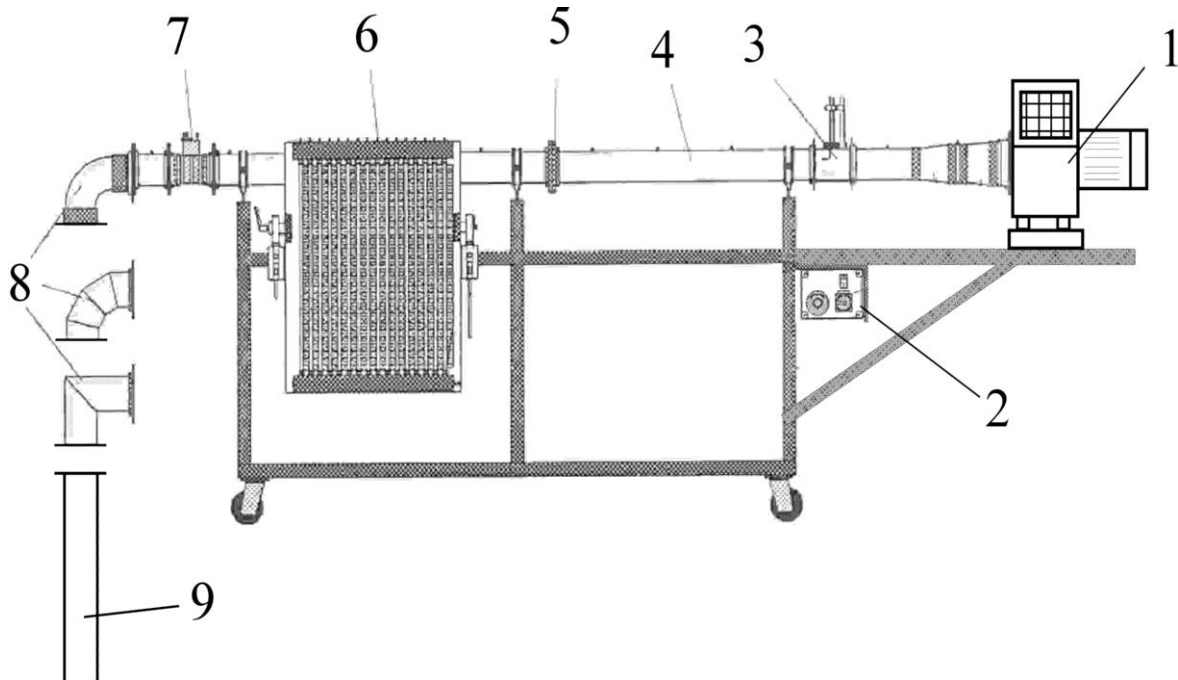


Abb. 7: Übersicht über die Anlage "Luftströmungen"

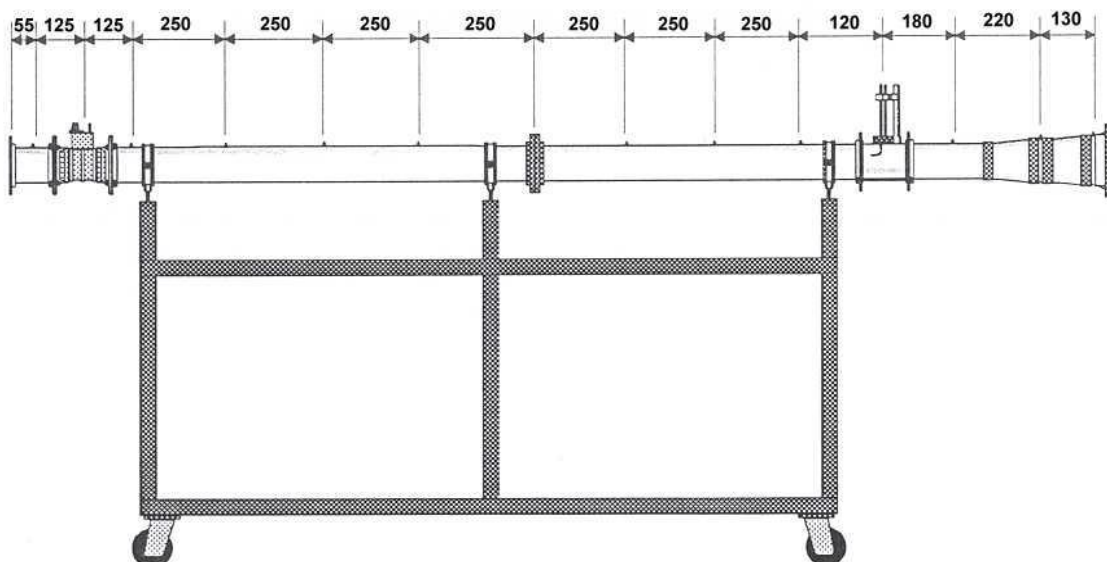


Abb. 8: Anordnung der Druckmessstellen an der Rohrstrecke

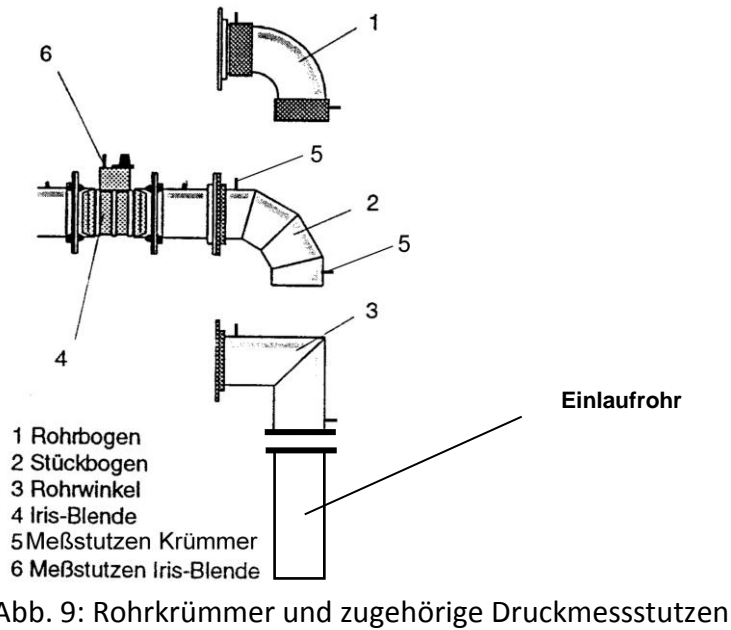


Abb. 9: Rohrkrümmer und zugehörige Druckmessstutzen

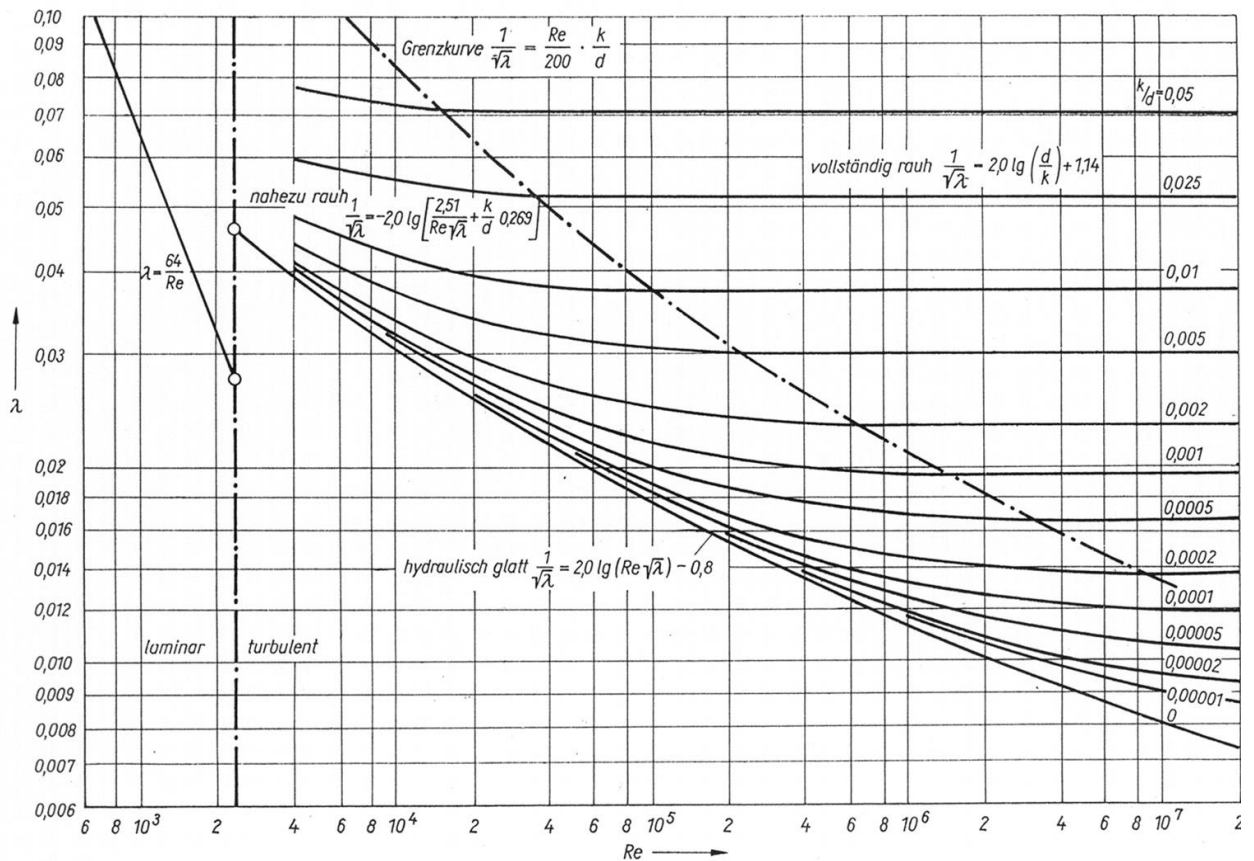


Abb. 10: Reibungsbeiwert für gerade Rohre in Abhängigkeit von der REYNOLDSzahl und der relativen Rauigkeit

8. Tabellen

Tabelle 1: Ermittlung des radialen Geschwindigkeitsprofils aus den Differenzhöhen des Manometers (s...Position Pitot-Rohr, r...Rohrradius)

Dichte der Sperrflüssigkeit: 915.6 kg/m³
 aktueller Luftdruck: hPa
 aktuelle Lufttemperatur: °C
 aktuelle relative Luftfeuchtigkeit: %
 dynamische Viskosität der Luft: 1.818 · 10⁻⁵ Pas

Neigung der Manometerbatterie:

$\Delta h_{\text{Messdüse}}$:

Volumenstrom: zu berechnen

	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
$s(r)$ [mm]	Δh []	Δh []	Δh []	$\Delta \bar{h}$ []
84.0 (42.0)	0	0	0	0
83.0 (41.0)				
82.5 (40.5)				
82.0 (40.0)				
81.5 (39.5)				
81.0 (39.0)				
80.5 (38.5)				
80.0 (38.0)				
79.5 (37.5)				
79.0 (37.0)				
78.5 (36.5)				
78.0 (36.0)				
77.0 (35.0)				
76.0 (34.0)				
73.5 (31.5)				
71.0 (29.0)				
68.5 (26.5)				
66.0 (24.0)				
63.5 (21.5)				
61.0 (19.0)				
58.5 (16.5)				
56.0 (14.0)				
53.5 (11.5)				
51.0 (9.0)				
48.0 (6.0)				
45.0 (3.0)				
42.0 (0) (Rohrmitte)				

Tabelle 2: Untersuchung des Rohrbogens (90°)

Krümmungsradius [mm]: 0.095 m

mittlere abgewickelte Lauflänge [mm]:

Durchmesser [mm]: 0.084 m

Stellung IRIS- Blende	Messdüse	Rohrbogen
	Δh []	Δh []
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Tabelle 3: Untersuchung des Rohrwinkels (90°)

mittlere abgewickelte Lauflänge [mm]:

Durchmesser [mm]: 0.084 m

Stellung IRIS- Blende	Messdüse	Rohrwinkel
	Δh []	Δh []
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Tabelle 4: Untersuchung des Stückbogens (3x30°)

mittlere abgewickelte Lauflänge [mm]:

Durchmesser [mm]: 0.084 m

Stellung IRIS- Blende	Messdüse	Stückbogen
	Δh []	Δh []
1		
2		
3		
4		
5		
6		