

Skript zum Versuch

Druckverluste in hydraulischen Systemen

1 Einleitung und Zielstellung

Druckverluste treten in allen hydraulischen Anlagen durch Reibung, Strömungsablösung oder Wirbelbildung auf. Die Verlustenergie wird überwiegend in Wärme umgesetzt und teils dem Druckmedium, teils der Umgebung zugeführt. Die Kenntnis der Zusammenhänge von Druckverlust, Energiewandlung, Strömungsform und Beschaffenheit und Aufbau der Anlage ist für das Verständnis hydraulischer Systeme von grundlegender Bedeutung und soll daher in diesem Versuch veranschaulicht werden. Hierzu werden Druckverluste von Rohrleitungen und Einzelhindernissen gemessen und bewertet.

Der Versuch ist an Hörer der Vorlesung „Ölhydraulik“ gerichtet. Als weiterführende Literatur zum Versuch ist das Vorlesungsskript geeignet.

2 Strömungsmechanische Grundlagen

Zur Beschreibung eindimensionaler, stationärer Strömungen wird die **Bernoulli-Gleichung** verwendet, die sich aus der Integration der Eulerschen Gleichung ergibt. Nach Bernoulli bleibt die Gesamtenergie, bestehend aus der **kinetischen Energie**, der **Lage- und Druckenergie** längs eines Stromfadens konstant. Lage- und Druckenergie bilden zusammen die **potentielle Energie**:

$$\frac{u_1^2}{2} + g \cdot z_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{u_2^2}{2} + g \cdot z_2 + \frac{p_2}{\rho} = \text{const.} \quad (\text{Energieform, vergl. Bild 2.1}) \quad (\text{Gl. 2.1})$$

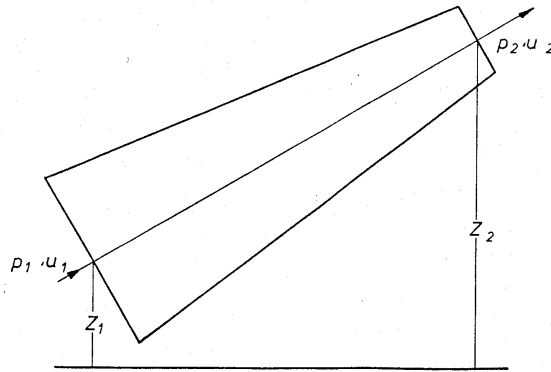


Bild 2.1: Stromfaden

In ihrer Druckform lautet die Bernoulli-Gleichung:

$$\frac{\rho}{2} \cdot u_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_1 + p_1 = \frac{\rho}{2} \cdot u_2^2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + p_2 = \text{const.} \quad (\text{Druckform}) \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Hierin ist $\frac{\rho}{2} \cdot u_1^2$ der **dynamische Druck** (Staudruck), $\rho \cdot g \cdot z_1$ der **geodätische Druck** und p_1 der **statische Druck**.

Zur Beschreibung einer verlustbehafteten Strömung wird die Bernoulli-Gleichung mit einem **Verlustglied Δp_v** erweitert. Δp_v ist der Druckverlust zwischen den Stellen 1 und 2 infolge von Rohrreibung, Einbauwiderständen usw.:

$$\frac{\rho}{2} \cdot u_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_1 + p_1 = \frac{\rho}{2} \cdot u_2^2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + p_2 + \Delta p_v \quad (\text{Gl. 2.3})$$

Am häufigsten wird der Druckverlust als Funktion des Staudrucks angegeben. Für den **Druckverlust in Rohrleitungen** gilt:

$$\Delta p_v = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} u^2 \quad (\text{Gl. 2.4})$$

(λ = Rohrreibungsbeiwert, l = Rohrlänge, d = Durchmesser, u = mittlere Strömungsgeschwindigkeit)

Für die laminare Rohrströmung ($Re < 2320$) gilt für den **Rohrreibungsbeiwert λ** :

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (\text{Gl. 2.5})$$

mit der **Reynoldszahl Re** :

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} = \frac{u \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad (\text{Gl. 2.6})$$

(ν = kinematische Viskosität, η = dynamische Viskosität).

Einsetzen von Gl. 2.5. und 2.6 in Gl. 2.4 macht deutlich, daß sich im Bereich der **laminaren Strömung** der Druckverlust Δp_v proportional zur Strömungsgeschwindigkeit verhält. Die Rohrrauigkeit hat bei laminarer Rohrströmung keinen Einfluß auf den Druckverlust. Wegen der Abhängigkeit von der dynamischen Viskosität η ist der Rohrreibungsbeiwert temperaturabhängig.

Im **Übergangsbereich** zwischen laminarer und voll turbulenter Strömung ($2320 < Re < 10^5$) ändert sich die Rohrreibungszahl stetig. Dieser Bereich ist für praktische Verhältnisse der Hydraulik am wichtigsten. Der Druckverlust wächst mit der n-ten Potenz der Strömungsgeschwindigkeit, wobei n zwischen 1 und 2 liegt. Zur Berechnung wird nach Blasius empfohlen:

$$\lambda = 0,3164 \cdot Re^{-0,25} \quad (\text{Gl. 2.7})$$

Dieser Rohrreibungsbeiwert entspricht in etwa dem „hydraulisch glatten Rohr“ der Strömungsmechanik.

Bei **voll ausgebildeter Turbulenz** ist der Druckverlust temperaturunabhängig und proportional dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit. Voll ausgebildete Turbulenz wird um so früher erreicht, je kleiner der Quotient aus Rohrradius r und Wandrauigkeit k ist (vergl. Bild 2.2). Nach Nikuradse gilt hierfür:

$$\lambda = \frac{1}{(2 \cdot \lg(3,71 \cdot d/k))^2} \quad (\text{Gl. 2.8})$$

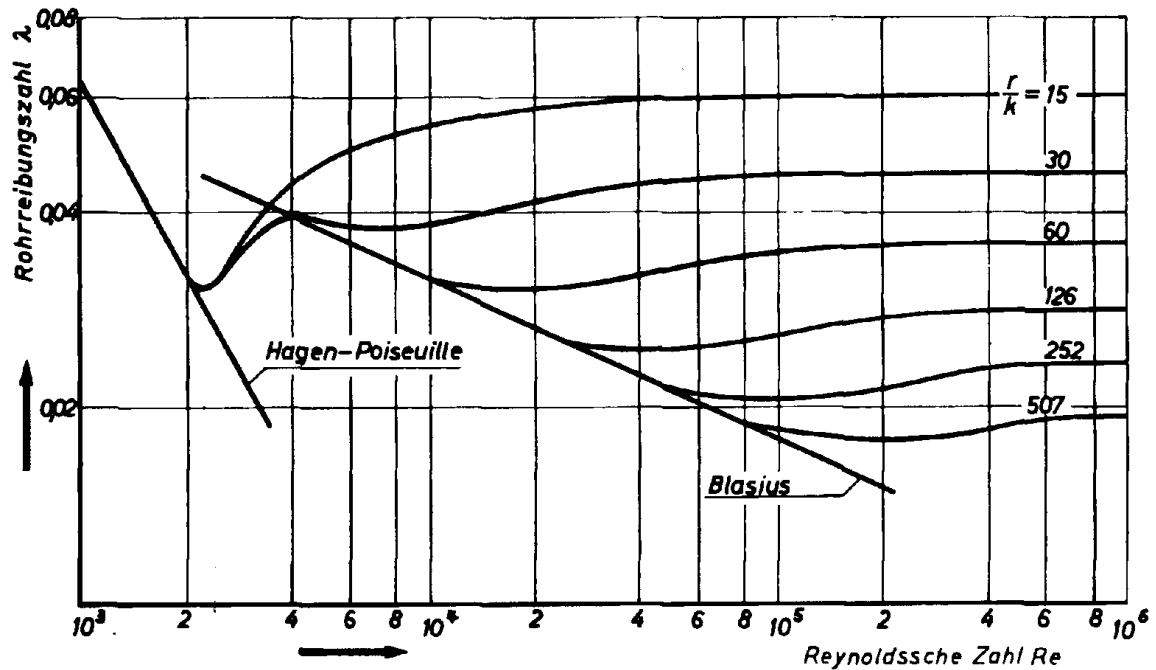


Bild 2.2: Rohrreibungszahl λ in Abhängigkeit der Reynoldszahl Re und der relativen Wandrauhigkeit r/k

Die meisten Einzelhindernisse der Hydraulik haben nicht die einfache Form einer Rohrleitung, sondern häufig eine kompliziertere konstruktive Gestalt (Rohrkrümmer, Kniestücke, T-Stücke, Rohrverengungen oder -erweiterungen usw.). Der **Druckverlust von Einzelhindernissen** wird mit der Gleichung

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u^2 \quad (\text{Gl. 2.9})$$

beschrieben (ζ = Verlustbeiwert). Im Bereich der laminaren Strömung ist ein von der Geometrie unabhängiges Verlustverhalten wie bei Rohrverlusten zu erwarten. Für den Bereich turbulenter Strömungen sind die Verlustbeiwerte ζ experimentell zu bestimmen. Gesamtverluste können in einfacher Weise durch Aufsummieren der Einzelverluste berechnet werden, sofern sich die Einzelwiderstände gegenseitig nicht beeinflussen.

Druckverluste in hydraulischen Anlagen sind Leistungsverluste und senken den Wirkungsgrad. Die in einem hydraulischen Widerstand verbrauchte **hydraulische Leistung** P_{hyd} errechnet sich mit der Gleichung:

$$P_{\text{hydr}} = \Delta p * Q \quad (\text{Gl. 2.10})$$

Darin ist Q der Volumenstrom durch den Widerstand und Δp die über dem Widerstand abfallende Druckdifferenz.

3 Messen von Drücken

Der statische Druck kann mit einem **U-Rohr-Manometer** und der Gesamtdruck (= statischer + dynamischer Druck) mit einem **Pitot-Rohr** gemessen werden (vergl. Bild 3.1 a, b). Der statische Druck p_{st} , den ein gedachtes, mit der Strömung mitbewegtes Manometer anzeigen würde, wird auch auf eine zur Strömung parallele Wand ausgeübt. Man kann den statischen Druck daher in einer sauberen, gratfreien Anbohrung der Wand messen (vergl. Bild 3.1 a). Der Gesamtdruck tritt im Staupunkt vor einem Hindernis dort auf, wo die Geschwindigkeit bis auf Null abnimmt. Bringt man hier eine Bohrung an (vergl. Bild 3.1 b), so wird in ihr der Gesamtdruck gemessen.

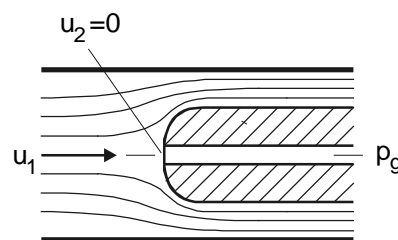
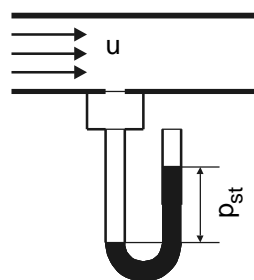


Bild 3.1 a: Messung des statischen Drucks **Bild 3.1 b: Messung des Gesamtdrucks**

Die Differenz aus Gesamtdruck und statischem Druck ist der dynamische Druck, der beim **Prandtl-Rohr** zusätzlich gemessen wird. In Bild 3.2 sind der Gesamtdruck und der statische

Druck als absolute Drücke angegeben. Dies setzt die Messung des Umgebungsdruckes p_0 mit einem Barometer voraus.

Aus dem dynamischen Druck erhält man die Strömungsgeschwindigkeit nach der Gleichung:

$$u_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot p_{\text{dyn}}} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

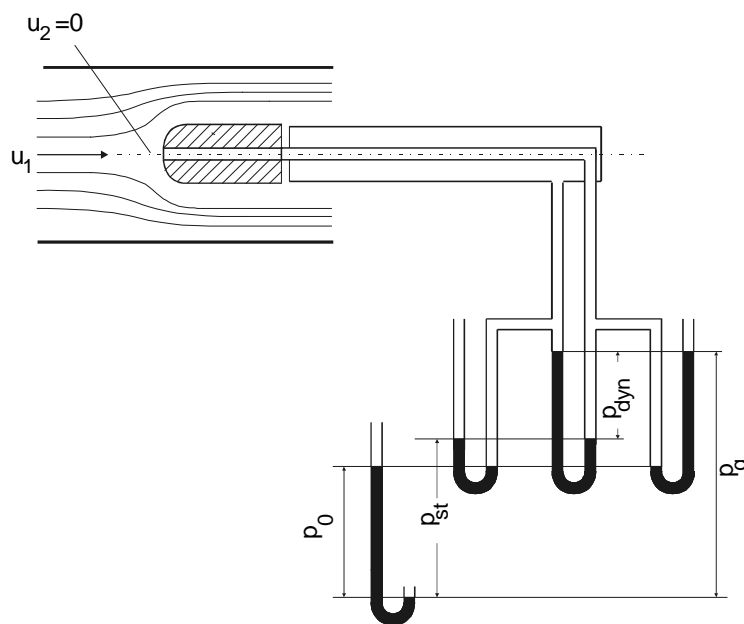


Bild 3.2: Prandtl-Rohr

Bei der Bestimmung von Druckverlusten in hydraulischen Systemen durch Messung des statischen Druckes an zwei Punkten muß unbedingt beachtet werden, welche Strömungsverhältnisse an den Meßpunkten vorliegen. Wenn $z_1 = z_2$ (gleiche Höhen) und $u_1 = u_2$ (gleiche Strömungsgeschwindigkeiten oder $u_1 = u_2 \approx 0$) und außerdem $\rho_1 = \rho_2$ (gleiche Dichten) vereinfacht sich Gl. 2.3 zu

$$\Delta p_v = p_1 - p_2 \quad (\text{Gl. 3.2})$$

Nur unter den oben genannten Bedingungen ist eine Bestimmung des Druckverlustes durch Messung der statischen Drücke an zwei Punkten sinnvoll.

Bei der Messung ist außerdem vor dem zu untersuchenden Element eine **Anlaufstrecke** vorzusehen. Bei Laminarströmung beträgt die Anlaufstrecke $l_a \approx 130 d$, bei turbulenter Strömung ist diese kleiner: $l_a \approx 50 d$.

Störungen, die in einer bereits ausgebildeten Strömung z. B. durch Einbauten erzeugt werden, müssen im weiteren Verlauf durch eine **Beruhigungstrecke** wieder ausgeglichen werden. Die Länge der Beruhigungstrecke entspricht im ungünstigsten Fall ungefähr der Länge der Anlaufstrecke.

Anlauf- und Beruhigungstrecke gewährleisten das gleiche Strömungsprofil an den Druckmeßpunkten, was für die Vergleichbarkeit der Drücke entscheidend ist.

4 Aufbau der Versuchsanlage

In der Versuchsanlage sind insgesamt zwei Meßstrecken mit dem Durchmesser 10 mm vorhanden (vergl. Bild 4.1). In der Meßstrecke 1 sind zwei 90° Krümmer vorhanden, in der Meßstrecke 2 befindet sich nur ein 90°-Krümmer (vergl. Bild 4.2 a,b). Der Abstand zwischen den Handventilen (Pos. 7.1, 7.2) und den Druckmeßstellen beträgt jeweils 130 d und zwischen den Handventilen und ersten Rohrkrümmern jeweils 150 d. Mit DMS-Druckaufnehmern werden am Anfang und am Ende der jeweiligen Messstrecke (Pos. 9.1, 9.2) die Absolutdrücke aufgenommen und am Messverstärker angezeigt. Aus der Differenz der beiden Werte ergibt sich der über der Messstrecke abfallende Druckverlust Δp .

Um die Erwärmung des Hydrauliköls später bei der Versuchsauswertung berücksichtigen zu können, wird an Ein- und Ausgang der Meßstrecken die Temperatur mit Thermoelementen (Pos. 6.1, 6.2) ermittelt. Das Volumen wird mit einem Ovalradzähler (Pos. 9) gemessen.

Die Anlage wird mit einer Zahnradpumpe (Pos. 1) betrieben, die durch einen Drehstrom-Asynchronmotor mit konstanter Drehzahl angetrieben wird. Durch ein im Bypass geschaltetes Drosselventil (Pos. 3) kann der in die Messstrecken fließende Volumenstrom verstellt werden.

Als Überlastschutz der Pumpe dient das Druckbegrenzungsventil (Pos. 2). Hinter der Pumpe befindet sich ein Speicher (Pos. 4) zur Pulsationsdämpfung.

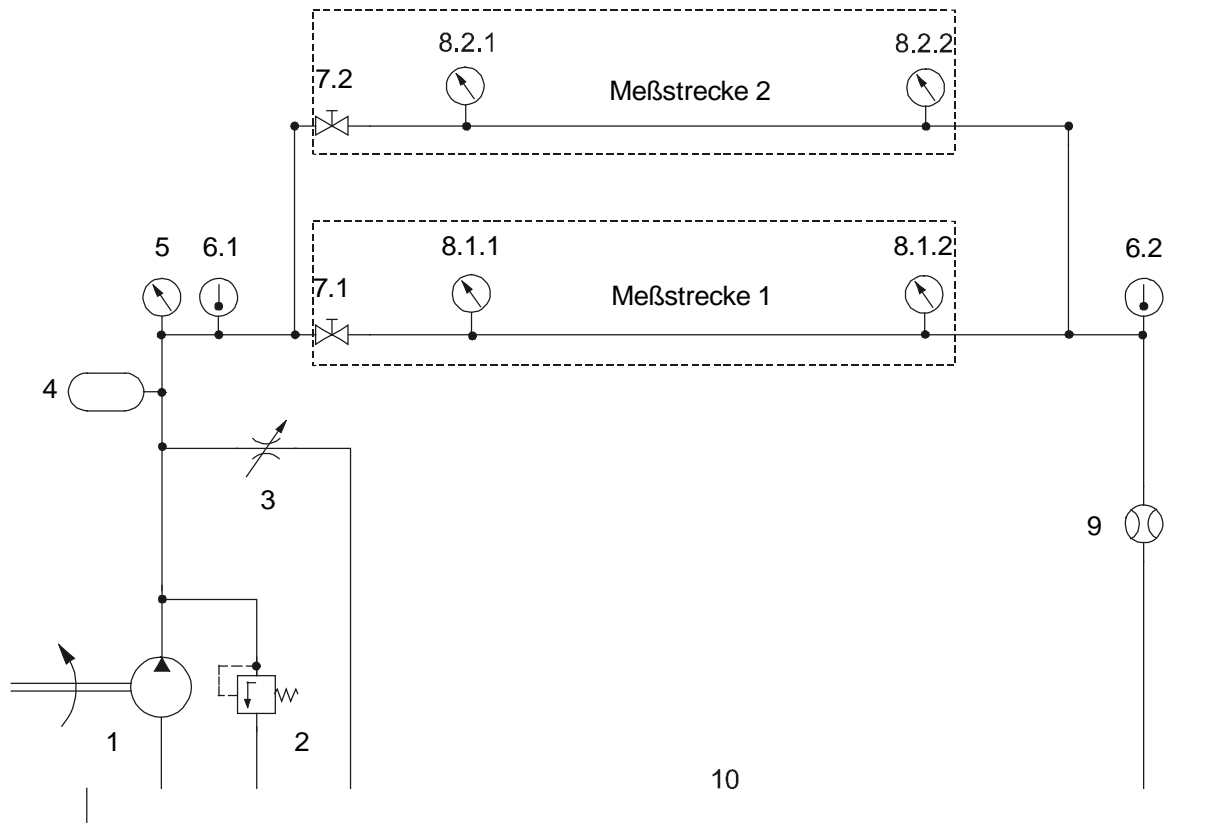


Bild 4.1: Hydraulischer Schaltplan der Versuchsanlage

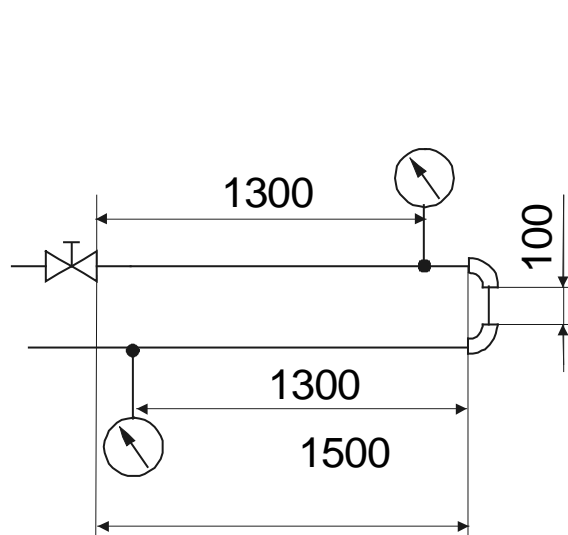


Bild 4.2 a: Messstrecke 1

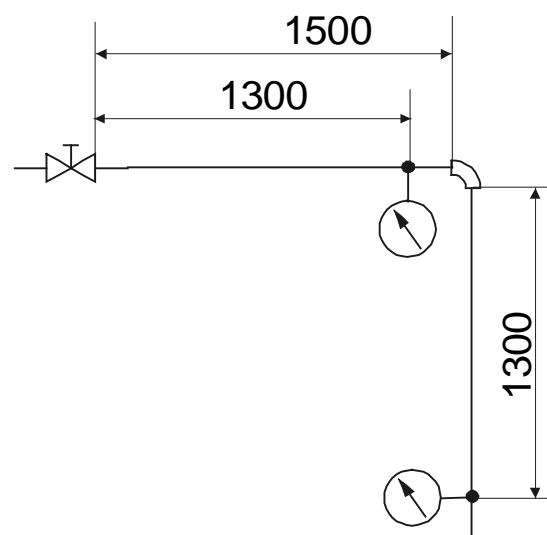


Bild 4.2 b: Messstrecke 2

5 Hinweise zur Versuchsdurchführung und -auswertung

Im Versuch sollen die Widerstandskennlinien von 90° -Krümmern bestimmt werden, d.h. der Zusammenhang $\zeta = f(\text{Re})$ im Bereich laminarer und turbulenter Rohrströmung. Die einstellbare und veränderliche Größe im Versuch ist der Volumenstrom. Gemessen werden die statische Drücke p_1 und p_2 , die Temperaturen ϑ_1 , ϑ_2 und der Volumenstrom Q .

Bestimmen Sie zunächst an der Meßstrecke 2 die Widerstandskennlinie eines einzelnen 90° -Krümmers! Erhöhen Sie dazu in geeigneten Intervallen den Volumenstrom und protokollieren Sie die Meßwerte für Volumenstrom, Druck und Temperatur! Berechnen Sie für die mittlere Temperatur ϑ die zugehörige Dichte, die dynamische Viskosität η und die kinematische Viskosität ν ! Für die Dichtebestimmung sind für das verwendete Öl zwei Meßpunkte bekannt, mit denen eine Geradengleichung aufgestellt werden kann:

$$P_1: \vartheta_1 = 25,7 \text{ }^\circ\text{C}; \rho_1 = 851 \text{ kg/m}^3 \quad P_2: \vartheta_2 = 63,2 \text{ }^\circ\text{C}; \rho_2 = 835 \text{ kg/m}^3$$

Die dynamische Viskosität kann mit der Vogel-Gleichung berechnet werden (Normöl FVA1):

$$\eta = a \cdot e^{\left(\frac{b}{c+\vartheta}\right)} \quad (\text{Gl. 5.1})$$

mit $a = 0,097 \cdot 10^{-3} \text{ Pas}$; $b = 685,082 \text{ }^\circ\text{C}$; $c = 98^\circ\text{C}$, $\vartheta [^\circ\text{C}]$

Bestimmen Sie die Reynoldszahl Re und die Rohrreibungszahl λ und berechnen Sie den Druckverlust in der Rohrleitung! Wie groß ist die Druckverlustziffer des 90° -Krümmers? Tragen Sie die Abhängigkeit $\zeta = f(\text{Re})$ in doppeltlogarithmischer Darstellung auf!

Nehmen Sie anschließend an der Meßstrecke 1 die Widerstandskennlinie der hintereinander angeordneten 90° -Krümmer auf! Wie groß ist die Druckverlustziffer aus der Summe beider 90° -Krümmer? Tragen Sie die Abhängigkeit $\zeta = f(\text{Re})$ wieder doppeltlogarithmisch auf und vergleichen Sie die hier ermittelte Druckverlustziffer mit der des einzelnen Krümmers! Diskutieren Sie die ermittelten Werte für die Druckverlustziffern!

Bestimmen Sie für beide Versuchsreihen die durch die Krümmer verursachte hydraulische Verlustleistung?

Führen Sie eine Abschätzung durch, welcher Meßfehler durch die Vernachlässigung des Höhenunterschiedes bei der Prüfstrecke 2 entstehen würde! Wie groß ist der Einfluß der Temperatur auf die Meßergebnisse?