

Messung 6

Messung des Strömungswiderstandes in Rohrbögen

1. EINLEITUNG

In der Ingenieurpraxis ist der Großteil der vorkommenden Strömungen Rohrströmung - man denke z.B. an Wasserleitungen, Abwasserkanäle, Erdöl- oder Erdgas Leitungen, Fernwärmeversorgung oder an einen Rohrnetzwerk innerhalb einer Chemie- oder Lebensmittelfabrik. Bei der Auslegung einer Rohrleitung ist die Abschätzung des Strömungswiderstandes von großer Bedeutung, weil die Kapazität der Strömungsmaschinen (Ventilatoren, Pumpen, usw.) anhand dieser Berechnungen ausgewählt wird.

Jedes Rohrelement verursacht einen Strömungswiderstand. Das einfachste Element ist ein gerades Rohrstück, es existieren jedoch zahlreiche unterschiedliche Elemente: Rohrbögen, Krümmer, T-Stücke, Querschnittsprünge, Ventile, Hähne, usw.

Bei *inkompressiblen* Medien - wenn der Durchmesser vor und nach dem Element gleich ist - kann der Widerstand die Strömungsgeschwindigkeit nicht verringern, da dies die Kontinuität nicht erlaubt. Infolgedessen meldet sich der durch den Widerstand verursachte Energieverlust in der Form eines **Druckverlustes**. Der Druckverlust wird als Unterschied zwischen den durchschnittlichen Druckwerten vor dem Element und nach dem Element definiert. Die Berechnung des Durchschnitts im jeweiligen Querschnitt ist nötig, weil sich der Druck wegen unterschiedlicher Asymmetrien in der Strömung auch innerhalb des Querschnittes verändern kann. In der Praxis wird der Durchschnitt durch Verbindung von vier, am Umfang gleichmäßig verteilten Druckentnahmestellen gemessen. In der aktuellen Messung wurde jedoch auf diese Methode wegen dem kleinen Rohrdurchmesser verzichtet.

Der Druckverlust wird mit folgender Formel berechnet:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \zeta \frac{\rho}{2} \bar{v}^2, \quad (1)$$

mit \bar{v} die mittlere Geschwindigkeit im Querschnitt, ρ die Dichte der Flüssigkeit, die in unserem Fall konstant ist, „1“ und „2“ sind die Querschnitte vor bzw. hinter dem Element, wo auch die Druckmessung stattfindet, ζ (sprich dzeta) ist der sog. Verlust-Beiwert.

ζ hängt sogar im Falle von einem einfachen Element von mehreren Parametern ab. ζ wird von der Strömungsgeschwindigkeit, von den Materialeigenschaften der Flüssigkeit, von der Wandrauhigkeit und von den geometrischen Parameter des Elements beeinflusst. Beispiele für das letztere sind ein Ventil der in verschiedenen Stufen geöffnet wird, Querschnittsverhältnisse einer scharfen Querschnitt Änderung, oder der eigentliche Zweck dieser Messung: Einfluß vom Krümmungsradius unterschiedlicher Krümmer (siehe Abbildung 1).

Der Verlust-Beiwert von verschiedenen Krümmern kann aus den Diagrammen oder Tabellen in Fachbüchern entnommen werden. Falls die nötigen Meßgeräte und Einrichtungen zur Verfügung stehen, so kann es auch durch Messung bestimmt werden.

2. DAS ZIEL DER MESSUNG

Das Ziel der Messung ist die Bestimmung des Verlust-Beiwertes für einen 90° Krümmer in Funktion von unterschiedlichen Geometrie Parametern und Strömungsgeschwindigkeiten.

Die Geometrie des Krümmers wird mit dem R/d Verhältnis charakterisiert, (R Krümmungsradius der Mittellinie, d Innendurchmesser des Rohres, siehe Abbildung 1). Die drei Meßgruppen werden je zwei unterschiedliche Krümmer messen - insgesamt sind das sechs Stück. Bei der Auswertung wird die Abhängigkeit des Verlustbeiwerts vom Krümmungsverhältnis ermittelt. Man erwartet, dass der Verlust-Beiwert bei wachsendem Krümmungsradius abnimmt.

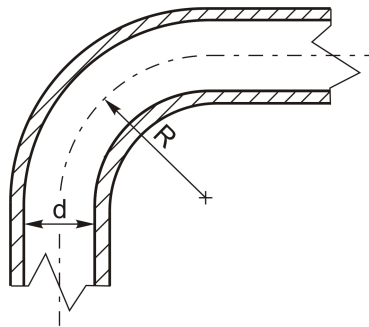


Abbildung 1: geometrische Parameter eines Krümmers

3. AUFBAU DER MEßEINRICHTUNG

Die Aufbauskinne der Meßeinrichtung ist in Abbildung 2 dargestellt. Die eingebaute WILO Heizwasser Zirkulierungspumpe (SZ) saugt Wasser aus dem Tank T. Das Wasser fließt in den Tank zurück. Die Rohrleitung, die zu messenden Krümmer und das Venturirohr befinden sich in einer horizontalen Ebene, damit die geodätische Höhe keine Rolle spielt. Der Volumenstrom wird mit dem Drosselventil (F) auf den gewünschten Wert eingestellt. Die folgenden sieben Druckentnahmestellen wurden im System eingebaut:

- h_1 : der Anfang vom geraden Rohrstück;
- h_2 : das Ende vom geraden Rohrstück und zugleich der Anfang vom ersten Krümmer;
- h_3 : das Ende vom ersten Krümmer;
- h_4 : der Anfang vom zweiten Krümmer;
- h_5 : das Ende vom zweiten Krümmer;
- h_6 und h_7 : die Entnahmestellen des Venturirohres bei d ; d_{\min}

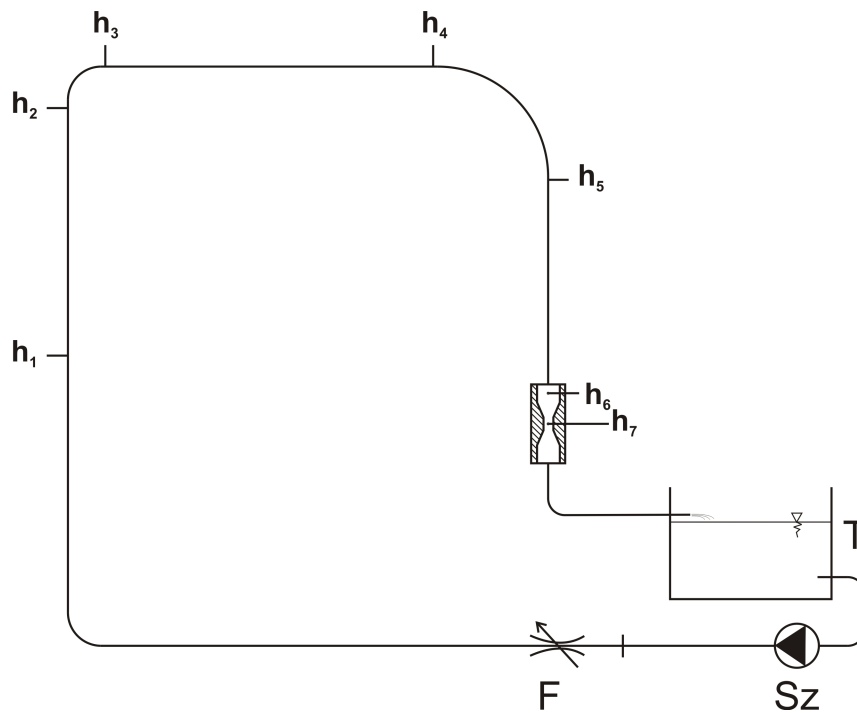


Abbildung 2: Aufbauskitze der Meßeinrichtung

4. DIE VERWENDETEN MESSGERÄTE

Während der Messung werden Geräte verwendet, die aus früheren Messungen bekannt sind, oder deren Funktionsweise im Vortrag erläutert wurde. In der Meßeinrichtung ist die Messung von mehreren Druckdifferenzen erforderlich. Um die Anzahl der Manometer zu vermindern wird zur Messung der Druckdifferenzen ein sog. **Multimanometer** (siehe Abbildung 3) verwendet. Die Meßflüssigkeit ist Wasser. Der Multimanometer ist die Zusammensetzung von mehreren Einzelmanometern. Die einzelnen Wassersäulehöhen in den Glasröhren des Manometers sind proportional zu einer beliebigen Nullpunkt gehörenden Druckdifferenz unterschied. Der Nullpunkt kann mit der Höhe des Manometers beeinflusst werden. In meisten Fällen (auch bei unserer Messung) hat das jedoch keine Bedeutung, da wir ausschließlich die Druckdifferenz zwischen den Druckentnahmestellen messen wollen und nicht den Absolutdruck. (Das ist übrigens typisch für die Strömung inkompressibler Medien: der Absolutdruck spielt keine Rolle, nur die Druckdifferenzen.)

Die Positionen der einzelnen Druckentnahmestellen wurden im vorigen Kapitel erläutert. Während der Messung sollen die zu den Entnahmestellen gehörenden Wassersäulehöhen abgelesen werden. Bei der Auswertung werden aus den Meßwerten die Säulehöhen-Unterschiede und die Druckdifferenzen berechnet.

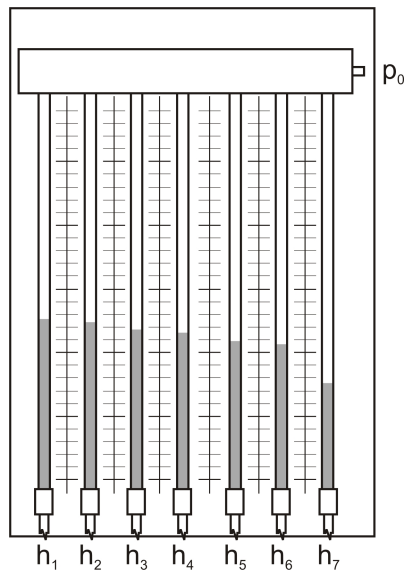


Abbildung 3: Multimanometer

Die Glasröhren sind oben auf die freie Atmosphäre offen

Für die Messung des Volumenstroms wird ein Venturirohr verwendet. Die Funktionsweise und die Formel des Venturirohres wurden in der Vorlesung erläutert.

Der Volumenstrom wird folgendermaßen berechnet:

$$Q = k \frac{d_{\min}^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \left[1 - \left(\frac{d_{\min}}{d} \right)^4 \right]}} \quad (2)$$

mit d und d_{\min} , Durchmesser in den Querschnitten der zwei Druckentnahmestellen (vor der Verengung beträgt der Rohrdurchmesser $d = 20$ mm, in der Verengung der minimale Durchmesser ist $d_{\min} = 11$ mm). Δp ist die Druckdifferenz zwischen den zwei Entnahmestellen 6 und 7, ρ die Dichte der im Rohr fließenden Flüssigkeit (in unserem Fall Wasser, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$), und eine Konstante k , der die Strömungsverluste im Venturirohr berücksichtigt. Das letztere ist notwendig, da die Verluste nicht vernachlässigt werden können. Für das Venturirohr in der Meßeinrichtung gilt $k = 0,96$.

Das Manometer-Gleichgewicht ergibt $\Delta p = \rho_m \cdot g \cdot \Delta h$, mit ρ_m die Dichte der Meßflüssigkeit und Δh der gemessene Wassersäulen-Höhenunterschied zwischen den Manometer-Röhren 6 und 7. Die Meßflüssigkeit ist Wasser, es gilt also: $\rho_m = \rho$.

Nach Einsetzen in die Formel (2) erhält man:

$$Q = k \frac{d_{\min}^2 \pi}{4} \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{d_{\min}}{d}\right)^4}} \quad (3)$$

Man bemerke, dass in (3) alle Werte außer Δh bekannte Konstante sind. Somit bekommt man schließlich die einfache Formel

$$Q = C\sqrt{\Delta h} \quad (4)$$

mit $C = \text{konstant}$.

5. ABLAUF DER MESSUNG

Beschreibung der Messung Schritt-für-Schritt:

- Man bestimme die Länge des Bogens (l_i) mit einem Messband und berechne das R/d Verhältnis! Achtung: die Entfernung zwischen den Druckentnahmestellen ist nicht immer gleich der Länge der Krümmer! Für die Berechnung von R soll das letztere, in Gleichungen (6) und (7) das vorige eingesetzt werden.
- Man lese die Wassersäulehöhen von h_1 bis h_7 bei 6-8 unterschiedlichen Volumenströmen ab. Der Volumenstrom wird mit dem Drosselventil F eingestellt, bei kleinen Volumenströmen soll das Ventil feiner geregelt werden. Sehr kleine Volumenströme sind zu vermeiden, da dort die Auswertung unbeständig wird. Deshalb sollte der Wassersäulen-Höhenunterschied zwischen dem Anfang und dem Ende des geraden Rohrstücks mindestens 30 mm sein.
- Anhand Formel (4) sollen die Volumenströme, des Weiteren die Durchschnittsgeschwindigkeiten innerhalb des Rohres berechnet werden. In die Tabelle soll der Volumenstrom in $[\text{cm}^3/\text{s}]$ eingetragen werden!
- Man berechne die Verlust-Beiwerte der beiden Krümmer anhand Formel (7). Der Durchschnitt dieser Beiwerte aus den 6-8 Meßergebnissen soll auch bestimmt werden!
- Folgen Sie die Anweisungen des Meßleiters und zeichnen Sie gemeinsam ein Diagramm: Der durchschnittliche Verlustbeiwert ζ_a soll in Funktion von den insgesamt 6 verschiedenen R/d Verhältnissen (siehe Kapitel 2) dargestellt werden!
- Rohrreibungsbeiwert λ muss mit der Hilfe von dem 5. Gleichung aus den Daten der ersten Zeile der Tabelle ausgerechnet werden. Das ist nur eine Kontrollrechnung.

6. AUSWERTUNG

Der Druckverlust in den Krümmern setzt sich aus zwei Faktoren zusammen: Reibung an der Rohrwand und Formwiderstand. In der Praxis ist die Trennung dieser beiden Verluste nicht eindeutig, aber mit dieser Auffassung ist es möglich Krümmer mit unterschiedlichen Krümmungsradien miteinander zu vergleichen. Die unterschiedlichen Krümmer besitzen verschiedene Längen. Den Unterschied, der durch die Bogenlänge entsteht, kann man eliminieren, indem man den Reibungsverlust eines mit dem Bogen äquivalenten geraden Rohrstückes vom Gesamtverlust subtrahiert. Somit werden ausschließlich die Formwiderstände (ζ_a) der einzelnen Krümmer miteinander verglichen.

Um den Reibungsverlust von einem äquivalenten geraden Rohrstück zu bestimmen, benötigt man den sog. Rohrreibungsbeiwert λ , sein Wert wird in der Messung vorgegeben: $\lambda = 0,019$. Diesen Wert soll man jedoch mit Hilfe des geraden Rohrstückes kontrollieren. Jeder Beteiligte in der Messung soll λ bei unterschiedlichen Volumenströmen mit der Umformung der bekannten Gleichung berechnen:

$$\lambda = \frac{\Delta p_{12}}{\frac{l}{d} \frac{\rho}{2} \bar{v}^2}. \quad (5)$$

Es sind hier Δp_{12} Druckdifferenz zwischen Druckentnahmestellen 1 und 2, l Länge desselben Rohrstückes, d der Innendurchmesser des Rohres (20 mm).

Der Gesamtdruckverlust des Krümmers, Δp_i besteht aus dem mit der Bogenlänge l_i berechneten äquivalenten Druckverlust des geraden Rohrstückes und dem Formwiderstand:

$$\Delta p = \zeta_a \frac{\rho}{2} \bar{v}^2 + \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho}{2} \bar{v}^2. \quad (6)$$

Daraus folgt:

$$\zeta_a = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} \bar{v}^2} - \lambda \frac{l}{d}. \quad (7)$$

7. VORBEREITUNG FÜR DIE MESSUNG

- Lernen Sie das Vorlesungskapitel Strömungsmechanik und die dazu gehörenden Übungsaufgaben! (Druckmessung, Kontinuitäts- und Bernoulli-Gleichung, Volumenstrom Messung mit Venturirohr, Strömungsverluste.)
- Berechnen Sie zuhause die Konstante C in der Gleichung (4). Dabei soll Δh in mm eingesetzt werden und man soll Q in cm^3/s erhalten. **Der korrekt berechnete Wert der Konstante C ist eine Voraussetzung für die Teilnahme an der Messung!**
- Bitte mitnehmen 1 Stück Millimeterpapier, Bleistift, Lineal, und Rechenmaschine auf der Messung!
- Füllen Sie das Bianco-Protokoll bis dem 4. Punkt aus! (Die weiteren Punkte werden wir in der Messung ausfüllen.)
- Die Studenten schreiben eine kurze (5-10 Minuten lange) Klausurarbeit vor der Messung. Die Probeaufgaben und die theoretische Fragen sind im Internet (www.hds.bme.hu).

Das Bemerken warten wir auf der folgenden Adresse: csizmadia@hds.bme.hu