



Staatliche Technikerschule Berlin

Laborbericht

Rohrreibung und Einzelwiderstände

Lutz Willek

Rayk Fleischfresser

Thomas Fritsch

26. Oktober 2005

Rohrreibung und Einzelwiderstände
Laborübung 4
Gruppe 4

Datum 26. Oktober 2005
Teilnehmer Thomas Fritsch, Rayk Fleischfresser, Lutz Willek
Betreuer Herr Tham
Ort Staatliche Technikerschule Berlin
Messprotokoll erstellt 10. Oktober 2005

Inhaltsverzeichnis

1. Vorbereitung des Versuches	5
1.1. Aufgabenstellung	5
1.2. Theoretische Grundlagen	5
1.3. Einzelwiderstandskoeffizient	7
1.4. Bestimmen der Reynoldszahl	10
1.5. Ermitteln der Rohrreibungszahl	10
1.6. Verwendete Messgeräte	13
2. Durchführung des Laborversuches	15
2.1. Versuchsaufbau	15
2.2. Versuchsdurchführung	15
3. Ergebnisse	17
3.1. Auswertung	17
3.2. Fehlerbetrachtung	22
A. Messprotokolle im Original	24
B. Laborbericht in elektronischer Form	27
C. Selbständigkeitserklärung	27

Verwendete Formelzeichen

A	Fläche	in m^2
d	Innendurchmesser des Rohres	in mm
k	Rauheitswert des Rohres	in mm
$\frac{k}{d}$	Verhältnis der Rauheit zum Innendurchmesser	dimensionslos
l	Länge des Rohres	in m
Re	Reynoldszahl	dimensionslos
\dot{V}	Volumenstrom	in m^3/h oder l/s
v	Geschwindigkeit des Mediums	in m/s
ν	kinematische Viskosität	in m^2/s
ρ	Dichte des Mediums	in kg/m^3
ζ	Widerstandskoeffizient	dimensionslos
λ	Rohrreibungszahl	dimensionslos
ϑ	Temperatur	in $^\circ\text{C}$
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	in $^\circ\text{C}$
Δp_E	Druckverlust durch Einzelwiderstände	in Pa
Δp_R	Druckverlust durch Rohrreibung	in Pa
Δp_V	Druckverlust allgemein	in Pa oder mm Ws

1. Vorbereitung des Versuches

1.1. Aufgabenstellung

Für die Versuchsanlage im Raum 120 der staatlichen Technikerschule Berlin sind die Einzelwiderstandskoeffizienten des Bogens sowie des Winkels bei verschiedenen Volumenströmen zu bestimmen. Die Messergebnisse sind graphisch sowie tabellarisch auszuwerten und mit den errechneten beziehungsweise den bekannten Werten zu vergleichen.

1.2. Theoretische Grundlagen

Wir wollen untersuchen, wie stark sich die Reibung bei verschiedenen Geschwindigkeiten innerhalb des Rohres und an Engstellen in der Anlage ändert und weiterhin die Reibung innerhalb von Engstellen mit der Reibung vergleichen, die 1m Rohr der gleichen Größe hat. Engstellen sind beispielsweise Armaturen, Bögen, Abzweigungen oder Vereinigungen von Rohrstücken. In diesen Engstellen, die auch Einzelwiderstände genannt werden, kann das Wasser nicht so ungehindert fließen, wie in einen vergleichbaren, geraden Stück Rohr.

Der ζ -Wert (Zeta-Wert, Widerstandskoeffizient) gibt an, um wie viel größer oder kleiner die Größe eines Einzelwiderstandes, verglichen mit dem Widerstand eines geraden Rohrstückes von 1 m Länge ist. Damit wird die Berechnung von Anlagen wesentlich erleichtert, da nur noch die Reibung der geraden Rohrstrecke berechnet werden muss. Einzelwiderstände werden einfach als Rohrstücke der gleichen Größe mit einer ihrer Reibung entsprechenden Länge eingesetzt. Doch woher bekommt man diese ζ -Werte? Zum einen können die ζ -Werte für jeden erdenklichen Einzelwiderstand Tabellenbüchern oder Normen entnommen werden. Das sind dann gemittelte Werte für den jeweiligen Werkstoff, für die Berechnung von Anlagen hinreichend genau.

Wir werden in unserem Versuch aufzeigen, wie man einen ζ -Wert berechnet. Dazu schauen wir uns die durch die Reibung entstehenden Verluste genauer an. Zuvor müssen jedoch einige Begriffe erklärt werden.

1.2.1. Reibung

Bei der Bewegung eines Stoffes treten der Bewegung entgegengesetzt wirkende Widerstände auf. Diese werden hervorgerufen durch Reibung des Stoffes mit seiner Umgebung. Diese Reibung benötigt Energie, die der Bewegungsenergie des Stoffes entzogen wird. Er wird also langsamer werden. In dem von uns untersuchtem Fall ist der untersuchte Stoff Wasser und die Umgebung ist das Rohr, in dem das Wasser fließt. Die Reibung von Flüssigkeiten in einem Rohr ist im wesentlichen abhängig von folgenden Größen:

- der Geschwindigkeit der Flüssigkeit innerhalb des Rohres
- Der Rauheit der Rohrwand
- Engstellen in der Anlage, also Einzelwiderstände
- der Temperatur der Flüssigkeit

- der Zähigkeit der Flüssigkeit

Bei der Geschwindigkeit der Flüssigkeit innerhalb des Rohres gibt es noch eine Besonderheit, die es zu beachten gilt. Es tritt nicht nur Reibung an den Wänden des Rohres auf, sondern auch zwischen den einzelnen Schichten der Flüssigkeit, die mit unterschiedlicher Geschwindigkeit im inneren des Rohres fließt. Diese Reibung nennt man innere Reibung. Die zwischen Flüssigkeit und Wandung auftretenden Widerstandskräfte werden als äußere Reibung oder Oberflächenreibung bezeichnet.

1.2.2. Viskosität

Die Viskosität beschreibt die Fließfähigkeit eines Mediums. Sie ist abhängig von Druck und Temperatur, bei Wasser ist sie relativ klein. Man erkennt deutlich in Tabelle 1, dass mit steigender Temperatur die Viskosität von Wasser sinkt, wie bei allen Flüssigkeiten. Die Viskosität von Gasen und Dämpfen nimmt hingegen mit wachsender Temperatur zu, eine Folge des molekularen Aufbaus. Die Einheit ist η in $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (dynamische Viskosität). In der Strömungstechnik wird jedoch mit der kinematischen Viskosität ν gerechnet, dem Verhältnis der Viskosität zur Dichte. Sie wird deshalb in $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ angegeben. In [3] ist die Viskosität weitergehend beschrieben.

Temperatur ϑ in $^{\circ}\text{C}$	Kinematische Viskosität ν in $10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
0	1,771
10	1,304
20	1,004
30	0,801
40	0,658
50	0,553
60	0,474
70	0,413
80	0,365
100	0,295

Tab. 1: Viskosität von Wasser

1.2.3. Strömung in Flüssigkeiten

1901 untersuchte Ludwig Prandtl Strömungsvorgänge. Eines der damaligen Ergebnisse ist heute als Grenzschichttheorie bekannt. Sie besagt, dass zum Mittelpunkt des Rohres die Strömungsgeschwindigkeit zunimmt, an den Rohrwänden selbst ist sie durch Adhäsion der Flüssigkeit fast bei Null. Diese Schichtung der Strömungsgeschwindigkeiten tritt nicht nur bei langsamen Geschwindigkeiten auf. Steigt nun die Geschwindigkeit weiter an, so wird die ruhende Schicht an der Rohroberfläche durch einen durch innere Reibung entstehenden Wirbel zu einer der Strömung entgegengesetzten Fließrichtung gezwungen.

Nach der Theorie von Prandtl entstehen zwischen Wandung und mittlerer Strömung weitere Einzelwirbel. Deshalb wird diese Strömung, wenn die Geschwindigkeit einen bestimmten Wert überschreitet, turbulente Strömung genannt. Es gibt jedoch bis heute keine einwandfreie analytische Erklärung zur Entstehung von Turbulenzen aus der laminaren Strömung. Erstmals forschte um 1880 der britische Ingenieur Osborne Reynolds [2] auf diesen Gebiet. Durch Versuche ermittelte er, dass folgende Einflussfaktoren an der Entstehung von turbulenter Strömung maßgeblich beteiligt sind:

- äußere Abmessungen des Rohres
- Strömungsgeschwindigkeit
- Viskosität des strömenden Mediums



Abb. 1: Osborne Reynolds, englischer Physiker (1842-1912)

Er wies weiterhin nach, dass der Umschlag von laminarer nach turbulenter Strömung berechenbar ist. Diese berechnete Zahl wird deshalb Reynoldszahl (siehe 1.4.1 auf Seite 10) genannt. Sie ist das Produkt aus Strömungsgeschwindigkeit, Rohrdurchmesser und Flüssigkeitsdichte, geteilt durch die Viskosität der Flüssigkeit. Da sich die Viskosität bei Flüssigkeiten mit steigender Temperatur verringert, muss auch die Temperatur des Fluids berücksichtigt werden. Die Reynoldszahl ist grob gesagt eine mathematische Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen [1].

Man spricht ab einer Reynoldszahl von etwa 2320 bei Rohrsystemen von einer turbulenten Strömung, darunter handelt es sich um eine laminare Strömung. Unter günstigen Bedingungen kann auch bei einer höheren Reynoldszahl noch laminare Strömung vorliegen, die jedoch bei einem Auftreffen auf ein Hindernis sofort in eine bleibende turbulente Strömung umschlägt. Wasser lässt bis zu einer Reynoldszahl von etwa 8000 bis 10000 eine instabile laminare Strömung zu. Durch die üblichen Strömungsgeschwindigkeiten in Rohrleitungen bedingt, handelt es sich in der Praxis so gut wie immer um eine turbulente Strömung.

1.3. Einzelwiderstandskoeffizient

Als erstes muss für den Reibungswiderstand bei verschiedenen Geschwindigkeiten eine Druckdifferenz gemessen werden. Dazu sind Messstellen an der Versuchsanlage angebracht, die über ein U-Rohr Manometer das Ablesen des jeweiligen, dort herrschenden Druckes ermöglichen. Es wird zum einen die Druckdifferenz eines 0,6 m langen, geraden Rohrstücks gemessen und zum anderen die Druckdifferenz eines 0,6 m langen Rohres mit

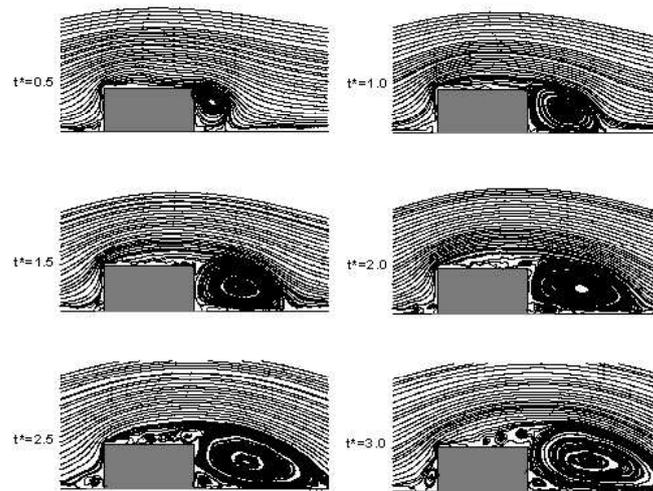


Abb. 2: Laminare und turbulente Strömung hinter einem Widerstand

Quelle: <http://www.bhrc.ar.ir/Bhrc/profile/heidarinejad/Bump.gif>

Bogen. Der Widerstand des geraden Referenzstücks wird abgezogen, so dass wir die Reibung für den Bogen erhalten. Warum so kompliziert? Die Anlage gestattet es uns nicht, den Druck genau vor und nach dem Bogen abzulesen. Selbst wenn direkt am Bogen Messstellen angebracht wären, die Ungenauigkeiten durch Strömung und Verwirbelungen wären dort zu groß. Die Druckdifferenzen mit den dazugehörigen Geschwindigkeiten werden aufgezeichnet.

Weiterhin wird die Dichte des Wassers für die Berechnungen benötigt. Dazu wird die Anlagentemperatur gemessen und die für die jeweilige Temperatur die entsprechende Dichte des Wassers aus Tabellen entnommen.

Die Strömungsgeschwindigkeit w wird aus dem gemessenen Volumenstrom und dem Innendurchmesser des Rohres wie folgt berechnet:

$$\dot{V} = w \cdot d^2 \cdot \frac{\pi}{4} \quad (1)$$

$$w = \frac{\dot{V}}{d^2 \cdot \frac{\pi}{4}} \quad (2)$$

Aus Strömungsgeschwindigkeit, Druckdifferenz und Dichte kann ζ errechnet werden:

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta P_E}{\rho \cdot w^2} \quad (3)$$

1.3.1. Beispielrechnung für einen Messwert

Nachfolgend wird anhand eines Messwertes für den Bogen die Berechnung erklärt.

- Abmessung des Rohres: 15×1 , entspricht einem Innendurchmesser von 13 mm
- Anlagentemperatur $30 \text{ }^\circ\text{C}$, entspricht einer Dichte von $995,7 \text{ kg/m}^3$
- Volumenstrom 150 l/h
- die Druckdifferenz für Messpunkt 1 bis 5 in mm Ws, wie in Tabelle 2 gegeben

Als erstes wird die Fläche des Rohres ausgerechnet:

$$\begin{aligned} A &= d^2 \cdot \frac{\pi}{4} \\ &= 0,013 \text{ m}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \\ &= 1,327 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Aus der Fläche und dem Volumenstrom berechnen wir uns die Strömungsgeschwindigkeit:

$$\begin{aligned} w &= \frac{\dot{V}}{A} \\ &= \frac{150 \frac{\text{l}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{1,327 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} \\ &= 0,314 \frac{\text{m}}{\text{s}} \end{aligned} \quad (5)$$

Der Differenzdruck beträgt für das Rohr 10 mm Ws und für das Rohrstück mit Bogen 25 mm Ws . Bleibt also nur für den Bogen ein Differenzdruck von 15 mm Ws . Dieser Wert muss noch in Pascal umgerechnet werden:

$$\begin{aligned} \Delta p_E &= h \cdot \rho \cdot g \\ &= 0,015 \text{ m} \cdot 995,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{Kg}} \\ &= 146,52 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \text{Pa} \end{aligned}$$

Erst jetzt kann ζ mit Formel 3 ermittelt werden:

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{2 \cdot \Delta P_E}{\rho \cdot w^2} \\ &= \frac{2 \cdot 146,52 \frac{\text{Kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}}{995,7 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(0,314 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} \\ &= 2,98 \end{aligned}$$

1.4. Bestimmen der Reynoldszahl

Die Reynoldszahl lässt sich nach folgender Gleichung bestimmen:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (6)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit und der Durchmesser sind bereits aus Abschnitt 1.3.1 bekannt

1.4.1. Beispielrechnung für einen Messwert

Nachfolgend wird anhand eines Messwertes für den Bogen die Reynoldszahl nach Formel 6 berechnet.

- Abmessung des Rohres: 15×1 , entspricht einem Innendurchmesser von 13 mm
- Anlagentemperatur 30°C , entspricht einer kinematischen Viskosität von $0,801 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
- Strömungsgeschwindigkeit = $0,314 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{w \cdot d}{\nu} \\ &= \frac{0,314 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,013 \text{ m}}{0,801 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \\ &= 5096 \end{aligned}$$

Die ermittelte Reynoldszahl ist größer als 2320, es handelt sich also um eine turbulente Strömung.

1.5. Ermitteln der Rohrreibungszahl

Da die Berechnung in Abschnitt 1.4.1 ergeben hat, dass es sich um eine turbulente Strömung handelt ist es nun wichtig festzustellen, ob das Rohr hydraulisch glatt oder rau ist. Danach richtet sich die Berechnung der Rohrreibungszahl.

Für die laminare Strömung bis zu einer Reynoldszahl von 2320 ist nach dem Gesetz von Hagen- Poiseuille λ eine reine Funktion von Re :

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (7)$$

Im Bereich der turbulenten Strömung macht sich die Rauheit als Störgröße bemerkbar. Jedoch muss die Rauigkeit einen bestimmten Grenzwert überschreiten. Wenn die Unebenheiten der Rohrwand noch kleiner sind als die Grenzschicht, so spricht man von hydraulisch glatten Rohren. Für Sie gilt:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg \frac{\text{Re} \sqrt{\lambda}}{2,54} \quad (8)$$

Für den Übergangsbereich zwischen hydraulisch glatten und rauen Rohren gilt:

$$\lambda = \left[-2 \log \left(\frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71d} \right) \right]^{-2} \quad (9)$$

Für hydraulisch raue Rohre gilt:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \lg \frac{3,71}{\frac{k}{d}} \quad (10)$$

Der Rauheitswert k kann beispielsweise [6] entnommen werden und beträgt für das im Versuch verwendete Rohr etwa 0,0014 mm.

1.5.1. Beispielrechnung zur Bestimmung der Rohrreibungszahl

Die Rohrreibungszahl lässt sich mit verschiedenen Ansätzen ermitteln:

1. über den gemessenen Druckverlust
2. mit Hilfe eines logarithmischen Diagramms
3. über Iteration berechnen

Druckverlust

folgende Werte sind aus 1.3.1 und 1.4.1 gegeben:

- Abmessung des Rohres: 15×1 , entspricht einem Innendurchmesser von 13 mm
- Anlagentemperatur $30 \text{ }^\circ\text{C}$, entspricht einer Dichte von $995,7 \text{ kg/m}^3$
- Strömungsgeschwindigkeit = $0,314 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- Volumenstrom = 150 l/h
- $\Delta p_R = h \cdot \rho \cdot g = 0,01 \text{ m} \cdot 995,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{Kg}} = 98 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 98 \text{ Pa} = 98 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$

Die Rohrreibungszahl lässt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{2 \cdot \Delta p_R \cdot d}{l \cdot \rho \cdot w^2} & (11) \\ &= \frac{2 \cdot 98 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2} \cdot 0,013 \text{ m}}{0,6 \text{ m} \cdot 995,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0,314 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2} \\ &= 0,0433 \end{aligned}$$

logarithmisches Diagramm

Mit Hilfe eines Diagramms lässt sich λ direkt ablesen, wenn die Reynoldszahl und das Verhältnis der Rohrrauigkeit zum Rohrrinnendurchmesser bekannt ist.

$$\frac{k}{d} = 1,0769 \cdot 10^{-4}$$

$$Re = 5096$$

Iteration

Die Berechnung über Iteration wurde in unserem Laborversuch [4] bereits ausführlich behandelt. λ lässt sich nicht direkt ermitteln, deshalb wird ein fiktiver Wert angenommen, eingesetzt, berechnet und dann das berechnete Ergebnis für die erneute Berechnung benutzt. Dieser Vorgang wird bis zur gewünschten Genauigkeit wiederholt. Mit Hilfe des logarithmischen Diagrammes wurde ermittelt, dass es sich um ein Rohr im Übergangsbereich zwischen hydraulisch glatten und rauen Rohren handelt. Deshalb wird Formel 9 benutzt.

1.6. Verwendete Messgeräte

Eine Auswahl der von uns verwendeten Messgeräte kann Abbildung 3 entnommen werden.

- **Rohrfederanometer**
Das oft für hohe Drücke verwendete Messgerät ist das Rohrfederanometer. Eine bogenartig geformte Röhre mit ovalem Querschnitt besitzt auf ihrer Außenseite eine größere Fläche als auf ihrer Innenseite. Wirkt nun auf die Innenwandungen der Röhre ein Druck, so sind die nach außen gerichteten Kräfte des Röhrenbogens größer als die nach innen gerichteten und die Röhre biegt sich auf. Diese Bewegung wird auf ein Drehwerk umgesetzt und durch den Zeiger als zunehmender Druck angezeigt.
- **U- Rohr- Manometer**
Messgerät, das wie das Rohrfederanometer zur Druckbestimmung eingesetzt wird. Eine grundsätzliche Beschreibung dieses Messgerätes kann [4], Anhang A3 entnommen werden. Das hier verwendete U- Rohr- Manometer bildet ein System aus kommunizierenden Röhren, an dem ein Druck abgelesen werden kann, der relativ zum aufgetragenen Gegendruck ist. Dadurch sind Messwerte verschiedener Messungen in ihrer Größe nicht direkt miteinander vergleichbar. Da aber nur der Differenzdruck benötigt wird, spielt das keine große Rolle, da der Gegendruck wieder herausgerechnet wird.
- **Schwebekörperdurchflussmesser**
Messgerät zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten oder Gasen. Eine Beschreibung kann [5], Seite 6 entnommen werden. Verwendeter Typ: Turbo , Messbereich 50 l/h bis 500 l/h, Skalierung 10 l/h.
- **Thermometer**
Eine Beschreibung dieses Messgerätes kann [4], Anhang A3 entnommen werden. Es wurde das gleiche Thermometer verwendet.
- **Pumpe**
Grundfos Typ UPS 25/40, dreistufig, Nummer G011, betrieben auf Stufe 1 und für die letzte Messung auf Stufe 2. Ein ähnlicher Pumpentyp wurde bereits in unseren Laborbericht [5] ab Seite 5 behandelt.

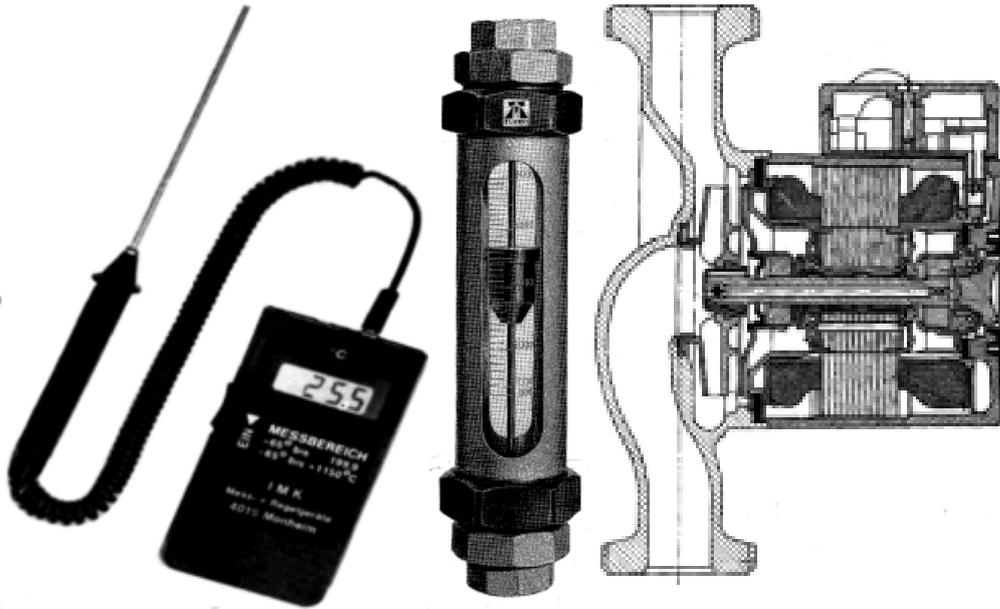


Abb. 3: Sekundenthermometer, Schwebekörperdurchflussmesser und Pumpenschnitt
Quelle: <http://r118-02/stb-hks.de/user-thk-ahk/labor.phtml#Meßgeräte>

2. Durchführung des Laborversuches

2.1. Versuchsaufbau

Bei der in Bild 4 dargestellten Anlage handelt es sich um einen Versuchsaufbau zur Bestimmung der Widerstandskoeffizienten von Einzelwiderständen und Widerständen von geraden Rohrstücken. Die Rohrleitungen bestehen aus Kupferrohr in der Dimension DN 12 nach DIN 1057.

An verschiedenen Stellen der Anlage sind Messstellen integriert, an denen der dort herrschende Druck über ein Manometer abgelesen werden kann. Die Messstellen sind als Messing T- Stücke ausgeführt. Sie sind über ein Schlauchsystem und Sammelbalken miteinander verbunden und bilden damit ein kommunizierendes System. Das Schlauchsystem wird über eine Wand mit Messskala geführt, wo die einzelnen Drücke abgelesen werden können. Die Anlage wird mit einer Pumpe vom Typ Grundfos UPS 25-40 betrieben. Sie befindet sich im Raum 120 der staatlichen Technikerschule Berlin, Bochumer Straße 8.

2.2. Versuchsdurchführung

Zu Beginn und am Ende des Versuches wurde die Lufttemperatur und die Temperatur des sich in der Anlage Wassers gemessen. Die Anlage wurde mittels Druckluft auf einen Druck von 0,4 bar gebracht und in Betrieb genommen. Die Pumpe lief während der ersten 10 Messungen auf Stufe eins, für die letzte Messung wurde auf Stufe 2 umgeschaltet. Das Ventil zwischen den T- Stücken wurde vollständig geschlossen, um den Differenzdruck des Bogens und des Winkels ermitteln zu können. Das zweite Ventil wurde auf den jeweiligen Volumenstrom eingedrosselt und mittels Schwebekörperdurchflussmesser kontrolliert. Es wurden 11 Messungen durchgeführt. Die Druckdifferenzen wurden an der Messwand abgelesen und sofort protokollarisch festgehalten.

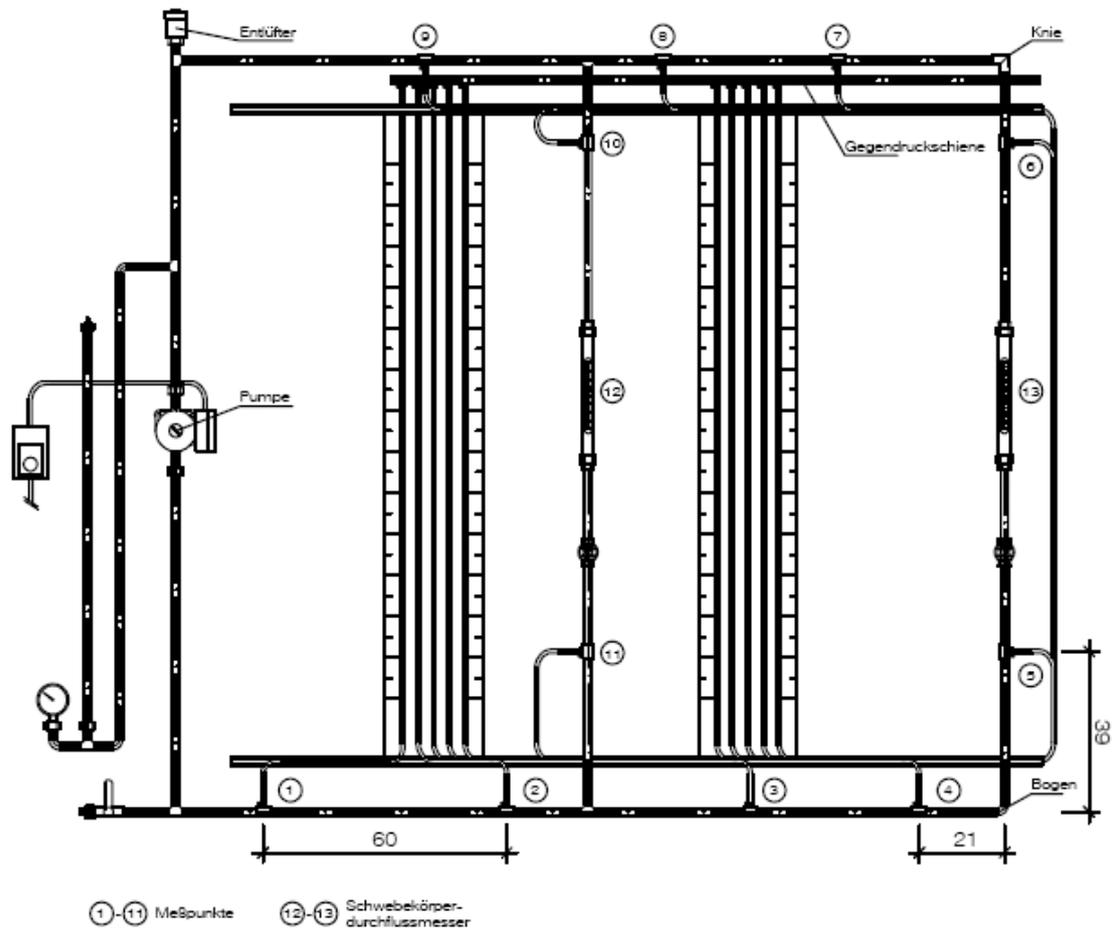


Abb. 4: Versuchsanlage zur Ermittlung von Rohrreibungszahl und Einzelwiderstandsbeiwerten, Raum 120, Staatliche Technikerschule Berlin
Quelle: Skript [10], Seite 10

3. Ergebnisse

3.1. Auswertung

In Tabelle 2 sind die erfassten Messwerte und unsere errechneten Ergebnisse zusammengestellt. Der aus den gemessenen Druckdifferenzen errechnete Widerstandskoeffizient ζ erreicht sehr ungleichmäßige Werte und ist im Vergleich zu den Werten aus der Literatur etwas höher. Aus den Diagrammen 5 und 6 ist zu entnehmen, dass sich der Widerstandskoeffizient mit größer werdenden Volumenströmen langsam auf einen festen Wert einstellt. Der ζ -Wert ist abhängig von Rohrdurchmesser, Rohrmaterial und Fließgeschwindigkeit, deshalb wird er auch nur durch Versuche mit praxisnahen Bedingungen ermittelt. Das erklärt auch die verschiedenen Werte, die in der Literatur zu finden sind. Beispielsweise werden in unserem Tabellenbuch [8] gleich zwei Werte für den Winkel angegeben, zum einen 1,3 für Wasser und zum anderen 2,0 für Heizungssysteme. Die angegebenen Werte für den Winkel variieren je nach Fachbuch zwischen 0,3 und 0,51. Die errechneten Widerstandskoeffizienten für kleine Volumenströme sind aus messtechnischen Gründen ungenau, einige wurden verworfen. Nähere Erläuterungen dazu finden Sie in Abschnitt 3.2. Unsere aus den Messungen errechneten Werte stimmen jedoch tendenziell mit denen aus der Literatur überein.

Es waren für den Versuch nur jeweils 10 Messungen für Bogen und Winkel geplant. Die messtechnisch hervorgerufene Ungenauigkeit bei kleinen Volumenströmen fiel jedoch schon während des Versuches auf. Deshalb wurde ein elfter Wert bei maximal möglichem Volumenstrom gemessen, ohne die Anlage anzupassen. Damit wurde die Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen zueinander sichergestellt. Er wird in den Diagrammen jedoch gesondert von den anderen Werten dargestellt, da er nicht zur ursprünglich geplanten Messreihe gehört.

Die ermittelte mittlere Rohrreibungszahl hat einen Wert um 0,04 und sinkt mit höher werdendem Volumenstrom. Es handelt sich hier also um ein hydraulisch glattes Rohr im Übergangsbereich zum hydraulisch rauhen Rohr. Die Kurve "Druckverlust" wurde nach Formel 11 berechnet. Der erste Wert der Kurve "Iteration" wurde nach Formel 7 berechnet, da an diesem Punkt noch laminare Strömung vorliegt. Alle weiteren Werte wurden nach Formel 9 berechnet. Auch hier fallen die großen Unterschiede zwischen beiden Kurven bei niedrigem Volumenstrom sehr gut auf.

Man erkennt in Diagramm 8 deutlich die Unterschiede zur Iterationskurve. Die beiden Kurven müssten sehr nah beieinander liegen, die Unterschiede sind also unsere Messfehler. Bei größer werdendem Volumenstrom gleichen sich die gemessenen und die errechneten Kurven aneinander an, der Messfehler sinkt. Deshalb ist erst ab einem Volumenstrom von etwa 150 Liter pro Stunde von genauen Werten auszugehen.

Versuchsweise wurden die gemessenen Werte auch nach Formel 8 iteriert. Die Werte für $\frac{k}{d}$ und Reynoldszahl lagen so dicht an der Schwelle für eine hydraulisch glatte Strömung, dass eine Überprüfung sinnvoll schien. Jedoch bewegten sie sich im Bereich der mit Formel 9 errechneten, ergaben keine neuen Erkenntnisse. Deshalb wurde auf eine Darstellung in Diagramm 8 bewusst verzichtet.

Die Abbildung 7 zeigt den Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Reynoldszahl

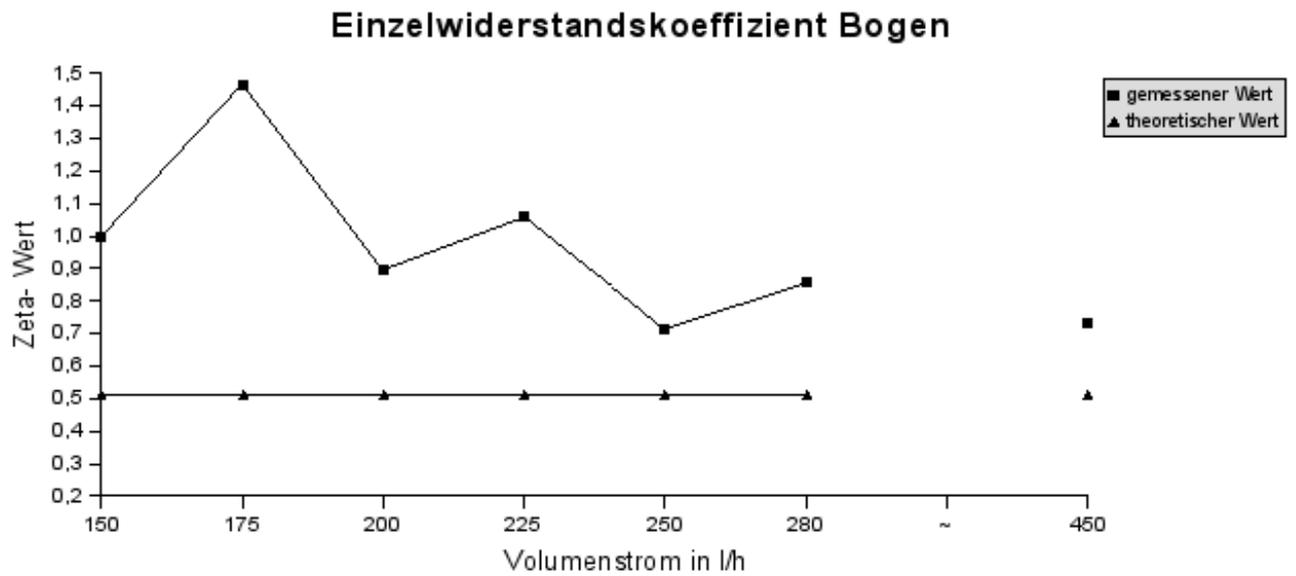


Abb. 5: errechneter Einzelwiderstandskoeffizient des Bogens in Abhängigkeit vom Volumenstrom

auf. Steigt der Volumenstrom und damit die Strömungsgeschwindigkeit in einem Rohrsystem, so steigt auch die Reynoldszahl. Leider ist in dem verwendeten Messsystem nur eine Rohrgröße verbaut. Sonst hätte man die Abhängigkeit der Reynoldszahl vom Rohrdurchmesser graphisch aufzeigen können. Wird der Rohrdurchmesser bei ansonsten identischen Volumenströmen größer, so sinkt die Reynoldszahl, da die Strömungsgeschwindigkeit abnimmt.

Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
\dot{V} in l/h	50	75	100	125	150	175	200	225	250	280	450
w in m/s	0,105	0,157	0,209	0,262	0,314	0,366	0,419	0,471	0,523	0,586	0,942
MP1 in mm WS	1200	1196	1180	1165	1150	1138	1125	1105	1090	1060	1357
MP2 in mm WS	1199	1190	1172	1155	1140	1128	1110	1090	1065	1035	1300
Δp_R in Pa	10	59	78	98	98	98	147	147	244	244	557
MP4 in mm WS	1196	1185	1166	1145	1125	1105	1083	1057	1030	987	1195
MP5 in mm WS	1195	1180	1160	1135	1110	1085	1060	1030	995	947	1105
Δp_E in Pa	10	49	59	98	147	195	225	264	342	391	897
Δp_V in Pa	* 0	* -10	* -20	* 0	49	98	78	117	98	147	332
MP6 in mm WS	415	430	455	480	507	535	565	600	640	695	575
MP7 in mm WS	410	425	445	465	485	515	535	565	485	512	535
Δp_E in Pa	49	49	98	147	215	225	293	391	488	586	1465
Δp_V in Pa	39	-10	20	49	117	127	147	244	244	342	908
ζ - Wert Bogen	* 0,0	* -0,8	* -0,9	* 0,0	1,0	1,5	0,9	1,1	0,7	0,9	0,7
ζ - Wert Winkel	* 7,2	* -0,8	0,9	1,4	2,4	1,9	1,7	2,2	1,8	2,0	2,1

Tab. 2: errechnete Werte im Überblick

Die mit einem * gekennzeichneten Werte sind ungültig und werden in den weiteren Diagrammen nicht dargestellt. Die Messungen Nummer eins bis vier beim Bogen und Nummer eins und zwei beim Winkel führten aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeiten bei Pumpenstufe 1 dazu, dass mit den abgelesenen Werten keine sinnvolle Berechnung möglich ist.

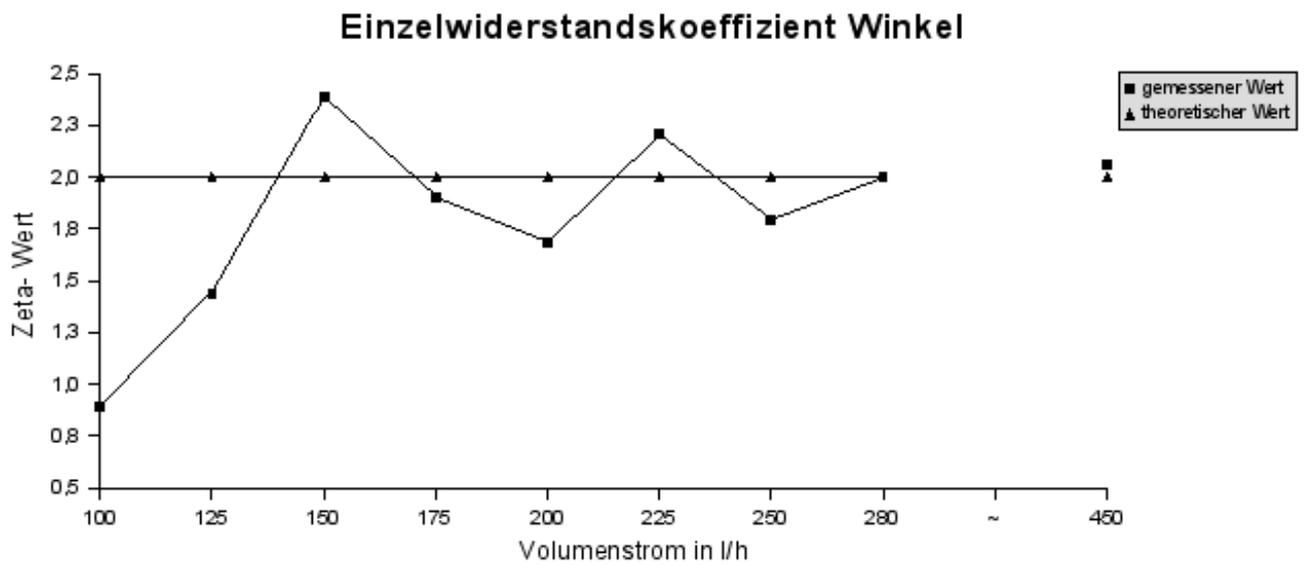


Abb. 6: errechneter Einzelwiderstandskoeffizient des Winkels in Abhängigkeit vom Volumenstrom

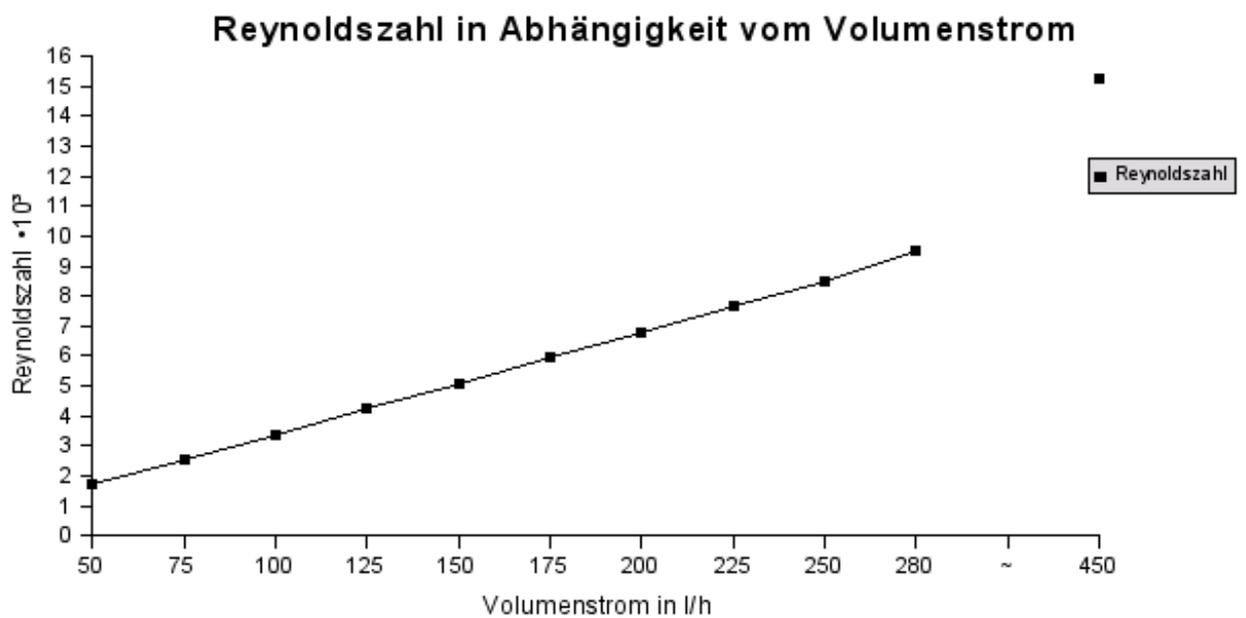


Abb. 7: errechnete Reynoldszahl in Abhängigkeit vom Volumenstrom

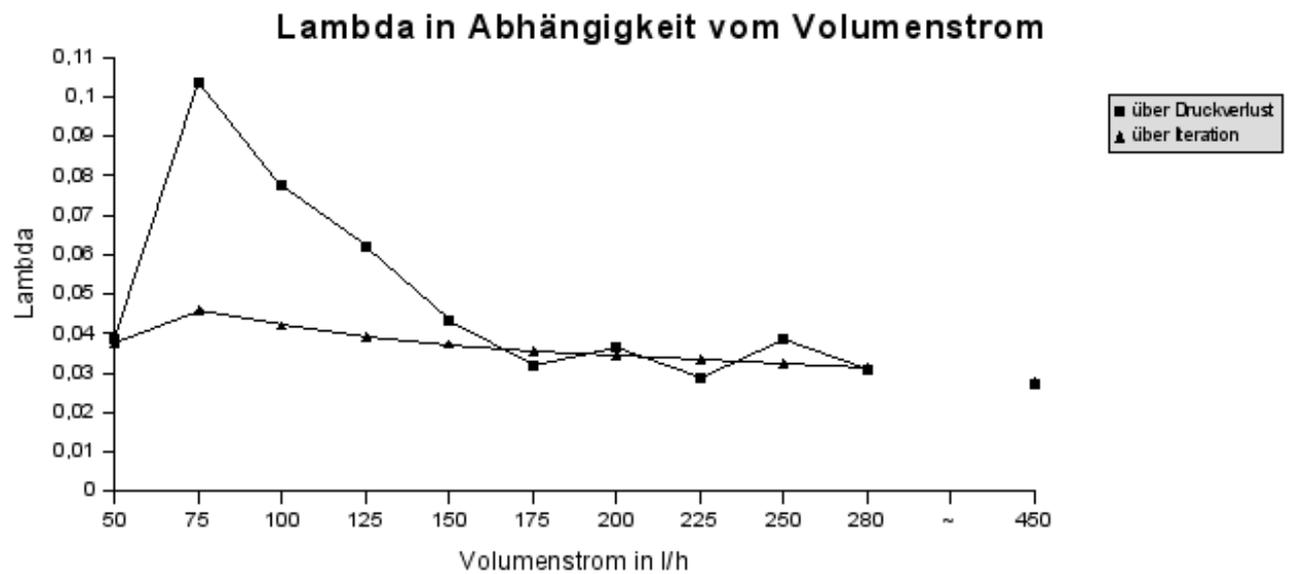


Abb. 8: Lambda in Abhängigkeit vom Volumenstrom

Nr.	\dot{V}	w	Re	λ nach Iteration	Formel
1	50	0,1	1698	0,037685842	(7)
2	75	0,16	2547	0,045873684	(9)
3	100	0,21	3397	0,042007303	(9)
4	125	0,26	4246	0,039324208	(9)
5	150	0,31	5095	0,037312663	(9)
6	175	0,37	5944	0,035726826	(9)
7	200	0,42	6793	0,034431611	(9)
8	225	0,47	7642	0,033345647	(9)
9	250	0,52	8491	0,032416521	(9)
10	280	0,59	9510	0,031459347	(9)
11	450	0,94	15284	0,027878539	(9)

Tab. 3: Iterierte Werte für Lambda

3.2. Fehlerbetrachtung

Während der ersten zehn Messungen wurde mit Pumpenstufe eins und relativ niedrigen Volumenströmen gemessen. Dadurch kam es zu Ablesefehlern, die im Verhältnis zum abgelesenen Differenzdruck sehr hoch waren. Erschwerend kam hinzu, dass die Pumpe keine absolut gleichmäßige Strömung lieferte. Dadurch kam es zu leichten Druckschwankungen, die sich in leichten Schwankungen im U-Rohr Manometer bemerkbar machten und damit den Messfehler erhöhten. Mit insgesamt höheren Volumenströmen wären auch die gemessenen Differenzdrücke höher und deshalb die ermittelten Werte besser, da dadurch das Verhältnis der Messgenauigkeit zum Messwert besser würde. Aus diesem Grund haben wir die ersten Messwerte nicht in unsere Auswertung mit aufgenommen, sie sind einfach zu ungenau und lassen keine gesicherten Ergebnisse zu.

Ein Verbesserungsvorschlag wäre also, bei höheren Volumenströmen zu messen. Wir konnten das leider nicht mehr während unseres Versuches umsetzen, da der Gegendruck der Anlage zu Beginn der Versuche auf Pumpenstufe eins eingestellt wurde. Eine Umstellung wäre in der uns vorgegebenen Zeit nicht möglich gewesen. Stattdessen haben wir lieber noch einen elften Messwert erfasst, den des maximal möglichen Volumenstromes, ohne die Anlage zu verändern.

Anstatt der Plastikschläuche, die durch Verunreinigungen und Ablagerungen sehr schlecht abzulesen sind, könnte man auch Digitalmanometer einbauen. Die Anlage wird dann auf einen gewünschten Volumenstrom eingestellt und die Displays fotografiert anstatt abgelesen. Damit wäre gewährleistet, dass die einzelnen Werte zeitgleich erfasst werden, anstatt wie mit der jetzigen Methode einfach nacheinander abgelesen würden. Damit wären auch die Fehler durch die Druckschwankungen der Pumpe ausgeschlossen. Mit diesen Maßnahmen wären auch niedrige Volumenströme noch gut erfassbar.

Zeta-Werte

Laborübung 4

Gruppe 4

Anhang

A. Messprotokolle im Original

Nachfolgend finden Sie die verwendeten Messprotokolle der Differenzdruckmessung des Bogens und des Winkels.

B. Laborbericht in elektronischer Form

Angehängt an diese Seite finden Sie den kompletten Laborbericht auf CD.

C. Selbständigkeitserklärung

Wir versichern hiermit an Eides statt, dass wir die vorliegende Arbeit bzw. die von uns namentlich gekennzeichneten Teile selbständig und ausschließlich unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel verfasst haben.

Berlin, der 26. Oktober 2005

Thomas Fritsch

Rayk Fleischfresser

Lutz Willek

Literatur

- [1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Navier-Stockes-Gleichungen>
- [2] http://de.wikipedia.org/wiki/Osborne_Reynolds
- [3] http://de.wikipedia.org/wiki/Kinematische_Viskosität
- [4] Fritsch, Fleischfresser, Willek: THK 3, Laborbericht 2: Netz- und Blendenmessung vom 30. 05. 2005, Staatliche Technikerschule Berlin, Bochumer Straße 8b, 10555 Berlin, unveröffentlicht.
- [5] Fritsch, Fleischfresser, Willek: THK 3, Laborbericht 1: Ermittlung von Pumpenkennlinien vom 17. 04. 2005, Staatliche Technikerschule Berlin, Bochumer Straße 8b, 10555 Berlin, unveröffentlicht.
- [6] Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 68. Auflage. Oldenburg Verlag, 1997. ISBN 3-486-26214-9
- [7] Recknagel, Sprenger: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 58. Ausgabe. R. Oldenburg Verlag, 1974. ISBN: 3-486-35918-5
- [8] Claus Ihle, Rolf Bader, Manfred Golla: Tabellenbuch Sanitär, Heizung, Lüftung. 4. Auflage, Bildungsverlag EINS, 2002. ISBN 3-441-92162-3
- [9] Wolfgang Kalide: Einführung in die technische Strömungslehre. Carl Hanser Verlag, 1976. ISBN 3-446-12152-8
- [10] Tham: Skript Laborversuche Heiz- und Raumlufttechnik vom 19. 09. 2005, Staatliche Technikerschule Berlin, Bochumer Straße 8b, 10555 Berlin, unveröffentlicht.