

**Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg**

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Institut für Mikro- und Sensorsysteme (IMOS)

---



## **Volumen- und Durchflussmessung (PM 4)**

# **Laborpraktikum Sensorik**

Betreuer: Dipl.-Ing. Adler  
Verfasser: Felix Bangemann, Philipp Bartels, Axel Winkler  
Ort, Datum: Magdeburg, 11.06.2009  
Datei: PM4\_Volumen-\_und\_Massendurchflußmessung\_fba\_pba\_awi.doc

# Inhaltsverzeichnis

1	VERSUCHSZIEL.....	3
2	GRUNDLAGEN ZUM VERSUCH.....	3
2.1	Aufgabenstellung.....	3
2.2	Vorbereitungsfragen .....	5
3	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	13
3.1	Messdaten.....	13
3.2	Auswertung.....	14
4	LITERATUR.....	16

# 1 Versuchsziel

Durchflußmeßverfahren nach den Wirkdruckprinzip besitzen in der Verfahrenstechnik eine große Verbreitung. Der gerätetechnische Aufwand für diese Verfahren ist sehr kostengünstig und robust im Einsatz. Volumetrische Zähler, wie z.B. Woltman- oder Ringkolbenzähler, sind Volumenmeßmittel, die unter Einbeziehung einer Zeitbasis als Meßmittel zur Durchflußreferenz benutzt werden. Sie besitzen eine geringe Meßunsicherheit und können damit als Prüfmittel für Durchflußmeßmittel dienen. Das Laborpraktikum Volumen- und Massedurchflußmessung dient so dem Kennenlernen des Verhaltens von Wirkdruckdurchflußmeßeinrichtungen und gyroskopischen Massedurchflußmeßeinrichtungen sowie dem Kennenlernen der meßtechnischen Eigenschaften von Woltmanzählern im Zusammenhang mit der Schaffung eines Referenzdurchflusses.

## 2 Grundlagen zum Versuch

### 2.1 Aufgabenstellung

#### 2.1.1

Leiten Sie den Zusammenhang  $\Delta p = f(\dot{V})$  für eine Normblende mit einem Durchmesser von  $D_0 = 16 \text{ mm}$  ab, die in ein Rohr mit einem Innendurchmesser von  $D_1 = 28,4 \text{ mm}$  eingebaut ist. Stellen Sie das Ergebnis für den Volumendurchfluß von Wasser bei  $20^\circ\text{C}$  ( $\rho(\vartheta_0) = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ) im Intervall  $(0,2 \leq \dot{V} \leq 1,1) \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  grafisch dar ( $\alpha$  ist dem **Bild 2** zu entnehmen)!

#### 2.1.2

Ermitteln Sie die Mindestmesszeit  $t_{\min}$  die erforderlich ist, um den gesamten Messfehler der Durchflußmessung mit dem Woltmanzähler kleiner als 1,5 % zu halten! Als Ableseunsicherheit sind für die Volumenmessung  $\pm 1$  Skalenteil  $= \pm 0,0001 \text{ m}^3$  und für die Zeitmessung  $\pm 1$  Sekunde zu berücksichtigen. Tragen Sie das Ergebnis als Diagramm im Intervall  $(0,2 \leq \dot{V} \leq 1,1) \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  über der Mindestmesszeit  $t_{\min}$  auf!

#### 2.1.3

Ermitteln Sie durch die Messung des Durchflusses mittels Woltmann-Zählers und des Differenzdrucks der Meßblende (Normblende) die Kennlinie  $\Delta p = f(\dot{V})$  der Meßblende im Intervall  $(0,2 \leq \dot{V} \leq 1,1) \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$  (Versuchsanordnung siehe **Bild 3**). Untersuchen Sie, ob die Durchflussszahl  $\alpha$  vom Durchfluß abhängig ist. Geben Sie bei einer derartigen Abhängigkeit den Gesamtfehler des Durchflusses an.

Zur Temperaturkorrektur der Dichte des Wassers benutzen Sie die Gleichung

$$\rho(\vartheta) = \rho(\vartheta_0) \cdot [1 + a \cdot (\vartheta - \vartheta_0)] \quad (1)$$

wobei  $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$  ist und der Koeffizient der Gleichung (1)  $a = -2,132 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{K}}$  ist.

**Hinweis:** Wählen Sie bei der grafischen Darstellung der Aufgabenstellung 2.1.1 und 2.1.3 eine quadratische Teilung der Ordinate.

!

#### 2.1.4

Messen Sie den Volumendurchfluss mit dem Woltman-Zähler, der Normblende und dem Corioliskraft-Durchflussmesser. Benutzen Sie dazu **mindestens 10** unterschiedliche Durchflüsse im Intervall  $(0,2 \leq \dot{V} \leq 1,1) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  und registrieren Sie die zugehörige Temperatur  $\vartheta$  des Mediums Wasser. Vergleichen Sie die mit diesen Messmitteln erzielten Messergebnisse und unterziehen Sie diese einer ausführlichen Fehlerbetrachtung!

## 2.2 Vorbereitungsfragen

### 2.2.1 Erläutern Sie die Kontinuitätsgleichung!

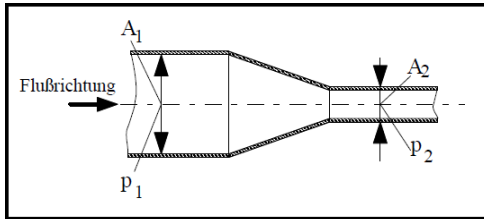


Abbildung 1: Drosselstelle

Durch den Massenerhaltungssatz folgt die Kontinuitätsgleichung, welcher in der oberen Abb. 1 folgende Form annimmt:

$$\dot{m} = \rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2 \quad (2)$$

da für inkompressible Strömungen gilt:  $\rho_1 = \rho_2$ , vereinfacht sich die Formel zu

$$\dot{V} = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (3)$$

### 2.2.2 In Erläutern Sie die Bernoullische Gleichung!

In strömenden Medien, werden drei verschiedenen Drücke erfasst, der totale Druck  $p_{ges}$ , der statische Druck  $p_{stat}$  und der dynamische Druck  $p_{dyn}$ . Diese Drücke werden mit Hilfe der Bernoullie-Gleichung miteinander verbunden:

$$p_{ges} = p_{stat} + p_{dyn} + \rho \cdot g \cdot h \quad (4)$$

Zwischen zwei Messpunkten, welche auf der gleichen Stromline sind und unter der Bedingung, dass es sich um eine stationäre und reibungsfreie Strömung handelt, gilt:

$$\frac{\rho_1}{2} \cdot \beta_1 + p_1 + \rho_1 \cdot g \cdot h = \frac{\rho_2}{2} \cdot \beta_2 + p_2 + \rho_2 \cdot g \cdot h \quad (5)$$

wobei  $\beta_1$  und  $\beta_2$  dimensionslose Energiebeiwerte (Profilbeiwerte) sind, welche die Geschwindigkeitsverteilung über dem Strömungsquerschnitt beschreibt.

### 2.2.3 Welcher Zusammenhang besteht zwischen kinematischer und dynamischer Viskosität?

Die Viskosität ist ein Maß für die „Zähigkeit“ eines Fluids. Zwischen der kinematischen und der dynamischen Viskosität, besteht ein proportionaler Zusammenhang:

$$\eta = \nu \cdot \rho \quad (6)$$

$\eta$  ... dynamische Viskosität

$\nu$  ... kinematische Viskosität

### 2.2.4 Wie verändern sich (qualitativ) kinematische und dynamische Viskosität bei Gasen und Flüssigkeiten infolge von Temperaturänderung?

Bei zunehmender Temperatur, steigt die Viskosität bei Gasen, und bei Flüssigkeiten sinkt die Viskosität.

### 2.2.5 Wie lässt sich die Viskosität messen?

Die Viskosität, kann durch einen Viskosimeter bestimmt. Es gibt unterschiedlichen Arten, wie z.B. Kugelfallviskosimeter oder Rotationsviskosimeter.

### 2.2.6 Leiten Sie die Durchflußgleichung ab!

Um die Durchflussgleichung abzuleiten, betrachten wir ein inkompressibles Fluids. Wir benutzen die Bernoulligleichung und setzen den ersten Querschnitt  $A_1$  vor der Drosselstelle, welcher ungestört ist. Der zweite Querschnitt  $A_2$  befindet sich am engsten Punkt:

$$p'_1 + \frac{\rho}{2} \cdot v'_1 \cdot \beta'_1 = p'_2 + \frac{\rho}{2} \cdot v'_2 \cdot \beta'_2 \quad (7)$$

Der engste Querschnitt  $A'_2$  ist von der Öffnung  $A_D$  der Drosselstelle abhängig und es folgt  $A'_2 = \mu \cdot A_D$ . Mit dem Öffnungsverhältnis  $m = \frac{A_D}{A'_1}$  und der Kontinuitätsgleichung ergibt sich:

$$v'_1 = \mu \cdot m \cdot v'_2 \quad (8)$$

Nun ergibt sich durch Umformung der Bernoulligleichung:

$$p'_1 + \frac{\rho}{2} \cdot v'^2_1 \cdot \beta'_1 = p'_2 + \frac{\rho}{2} \cdot v'^2_2 \cdot \beta'_2 \quad (9)$$

$$p'_1 - p'_2 = \frac{\rho}{2} (\beta'_2 \cdot v'^2_2 - \beta'_1 \cdot v'^2_1) \quad (10)$$

$$p'_1 - p'_2 = \frac{\rho}{2} (\beta'_2 \cdot v'^2_2 - \beta'_1 \cdot \mu^2 m^2 v'^2_2) \quad (11)$$

$$p'_1 - p'_2 = \frac{\rho}{2} \cdot v'^2_2 \cdot (\beta'_2 - \beta'_1 \cdot \mu^2 m^2) \quad (12)$$

$$v'_2 = \frac{1}{\sqrt{\beta'_2 - \beta'_1 \cdot \mu^2 m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p'_1 - p'_2)} \quad (13)$$

$$\dot{V} = A_2 \cdot v'_2 = \frac{A_2}{\sqrt{\beta'_2 - \beta'_1 \cdot \mu^2 m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p'_1 - p'_2)} \quad (14)$$

Für die Bernoulligleichung ergibt sich somit:

$$\dot{V} = \frac{A_D \cdot \mu}{\sqrt{\beta'_2 - \beta'_1 \cdot \mu^2 m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p'_1 - p'_2)} \quad (15)$$

Jedoch müssen noch einige Korrekturen durchgeführt werden, da die Drücke  $p_1$  und  $p_2$  im Gegensatz zu  $p'_1$  und  $p'_2$  direkt hinter bzw. vor der Drosselstelle angesetzt sind, muss der Beiwert  $\xi$  eingeführt werden, womit sich ergibt:

$$\dot{V} = \frac{A_D \cdot \mu \cdot \xi}{\sqrt{\beta'_2 - \beta'_1 \cdot \mu^2 m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p} \quad (16)$$

Da alle Einflüsse nicht voneinander getrennt werden können, werden diese in  $\alpha$  zusammengefasst:

$$\alpha = \frac{\mu \cdot \xi}{\sqrt{\beta'_2 - \beta'_1 \cdot \mu^2 m^2}} \quad (17)$$

Mit der Expansionszahl  $\varepsilon$ , welche die Expansion vom Druck  $p_1$  zum  $p_2$  beschreibt, kommt man zur Durchflussgleichung:

$$\dot{V} = A_D \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p} \quad (18)$$

### 2.2.7 Welche Größen beeinflussen $\alpha$ und wie ist ihr Einfluß zu berücksichtigen?

Die Durchflusszahl  $\alpha$  beschreibt die tatsächliche Fördermenge zur theoretisch möglichen Fördermenge. Für die Durchflusszahl gilt:

$$\alpha = f\left(m, \text{Re}, \frac{k}{D}\right) \quad (19)$$

$m$  ... Öffnungsverhalten  $\frac{A_0}{A_1}$

$\text{Re}$  ... Reynolds-Zahl

$\frac{k}{D}$  ... gilt für raue Rohre

Bei uns gilt jedoch nur die Abhängigkeit  $\alpha = f(m, \text{Re})$ , welche Bild 2 der Versuchsanleitung entnommen werden kann.

### 2.2.8 Welche Größen beeinflussen $\rho$ und wie ist ihr Einfluß zu berücksichtigen?

Die Dichte  $\rho$  des Fluids, ist von der Temperatur  $\vartheta$  abhängig. Dies ist durch Gleichung 1 bestimmbar:

$$\rho(\vartheta) = \rho(\vartheta_0) \cdot [1 + a \cdot (\vartheta - \vartheta_0)]$$

### 2.2.9 Welche Größen beeinflussen $\varepsilon$ ?

Die Expansionszahl  $\varepsilon$  beschreibt die Dichteänderung des Mediums auf die Durchflussmessung.

Bei inkompressiblen Medien kommt es zu keiner Dichteänderung, daher ist die Expansionszahl  $\varepsilon = 1$ .

Bei kompressiblen Medien, weicht die Expansionszahl von der 1 ab ( $\varepsilon < 1$ ).

### 2.2.10 Welche Drosselgeräte sind standardisiert?

Nach der DIN 1952 werden zunächst nur Drosselgeräte genormt, in denen die stationär Strömung im Unterschallbereich liegt.

Aufgenommen wurden die Blende, die Düse und die Venturidüse.

### 2.2.11 Was ist beim Einbau von Drosselgeräten zu beachten

Beim Einbau von Drosselgeräten ist zu beachten, dass es ein störungsfreien Zu- und Ablauf gibt. Ebenfalls ist es wichtig, dass das Drosselgerät in einem hinreichenden langen und waagerechten Rohr eingebaut wird und das Krümmungen bzw. Ventile soweit vor dem Drosselgerät sind, so dass dort die Störungen abgeklungen sind. Eine Kalibrierung ist nicht nötig, wenn die DIN 1952 eingehalten wird.

### 2.2.12 Welcher Unterschied besteht zwischen laminaren und turbulenten Strömungen?

Bei einer laminaren Strömung ( $Re < 2300$ ) verlaufen alle Teilströmungen in eine Richtung, d.h. es kommt zu keiner Verwirbelung.

Im Gegensatz dazu kommt es bei turbulenten Strömungen ( $Re > 2300$ ) zu Verwirbelungen.

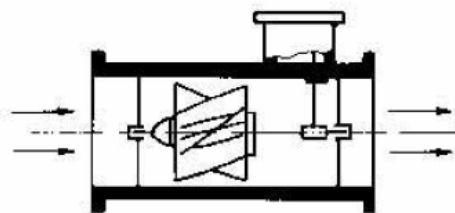
Beide Strömungen werden in Abbildung 2 dargestellt:



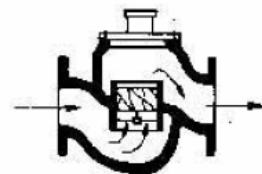
Abbildung 2: Laminare und turbulente Strömung

### 2.2.13 Wie ist ein Woltman-Zähler aufgebaut?

Bei einem Woltman-Zähler wird das Flügelrad axial von der Strömung angetrieben. Die Drehzahl, des Flügelrades, ist die Geschwindigkeit der Strömung und diese ist proportional zum Volumendurchfluss. Der Messfehler, welcher dabei entsteht, ist für geringe Durchflüsse am größten, da dieser abhängig vom Durchfluss ist.



Zähler mit Axialflügel



Zähler mit Senkrechtflügel

Abbildung 3: Aufbau des Woltman-Zählers



### 2.2.14 Wie sehen die Fehlerkurven von Woltman- und Ringkolbenzählern aus?

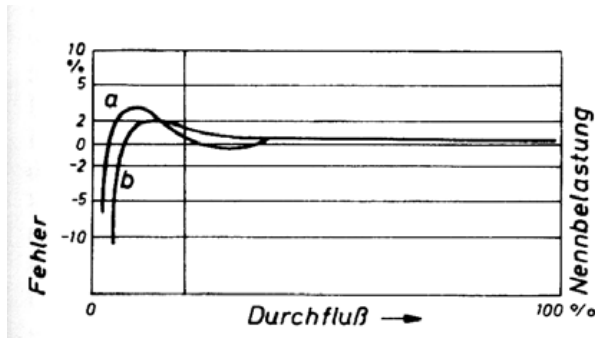


Abbildung 4: Fehler beim Woltman-Zähler

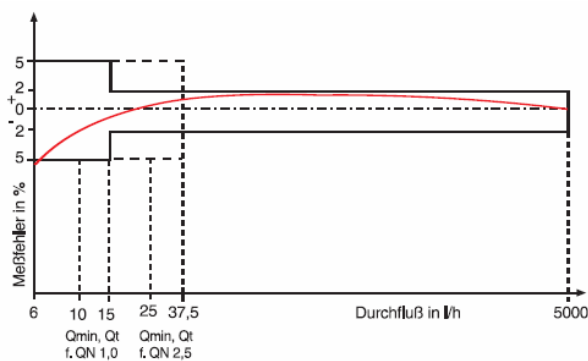


Abbildung 5: Fehler beim Ringkolbenzähler

### 2.2.15 Geben Sie die vollständige Messkette von Durchflußmeßeinrichtungen mit Wirkdruckmeßgeräte an!

### 2.2.16 Erläutern Sie das physikalische Grundprinzip und die Funktionsweise gyroskopischer Massedurchflussmesser und zeigen sie Möglichkeiten des konstruktiven Aufbaus derartiger Messgeräte!

Der gyroskopische Massendurchflussmesser benutzt den Effekt der Corioliskräfte aus. Diese Kräfte entstehen, wenn in einem System gleichzeitig translatorische und rotatorische Bewegungen sich überlagern. Es gilt die Allgemeine Formel:

$$\vec{F}_C = -2 \cdot m \cdot (\vec{v} \times \vec{\omega}) \quad (20)$$

$\vec{F}_C$  ... Corioliskraft

$m$  ... bewegte Masse

$\vec{v}$  ... Bewegungsgeschwindigkeit der Masse

$\vec{\omega}$  ... Winkelgeschwindigkeit

Um Corioliskräfte für eine gyroskopische Messung in einem strömenden Fluid zu erzeugen, wird das Fluid durch ein U-Rohr geleitet. Das U-Rohr wird mittels eines Elektromagneten um die Achse 1 (Abbildung 6) mit einer bestimmten Erregerfrequenz zum Schwingen angeregt. Dadurch entstehen die Rotationsgeschwindigkeiten, die mit der Richtung der Rotationsachse 1 übereinstimmt. Die Überlagerung der translatorischen und der rotatorischen Bewegung finden nur bei der Ein- und Auslaufkrümmung statt, bei der

restlichen Krümmung ist der Rotationsgeschwindigkeitsvektor annähernd parallel zum Translationsgeschwindigkeitsvektor, deshalb ist das Kreuzprodukt der beiden Vektoren Null. Betragsmäßig kann die Corioliskraft an einer Krümmungsstelle wie folgt aufgefasst werden:

$$F = m \cdot v \cdot \omega \quad (21)$$

Durch das Kreuzprodukt wird die Richtung der Kräfte festgelegt, welche senkrecht zur aufgespannten Ebene der Translations- und Rotationsgeschwindigkeit ist. Bei der Eingangskrümmung ist die Translationsgeschwindigkeit umgekehrt zur Ausgangskrümmung, d.h. eine Kraftkomponente wirkt der zweiten Kraftkomponente entgegen. Dies hat zur Folge, dass sich das U-Rohr um die Achse 2 periodisch verdreht, welche durch die Erregerfrequenz des Elektromagneten bestimmt wird. Da das U-Rohr symmetrisch aufgebaut ist, kann das Drehmoment betragsmäßig bestimmt werden:

$$M = F \cdot r \quad (22)$$

M ... Drehmoment

r ... Radius der Krümmung

Daraus resultiert eine Torsion des U-Rohrs um den Winkel  $\alpha$  welche ein Direktionsmoment verursacht. Sobald der Winkel  $\alpha$  erreicht wird, befindet sich das Drehmoment M im Gleichgewicht mit dem Direktionsmoment:

$$M_D = c \cdot \alpha = M \quad (23)$$

$M_D$  ... Drehmoment vom Direktionsmoment

c ... Direktionsmoment

$\alpha$  ... Torsionswinkel

Damit ergibt sich für den Torsionswinkel:

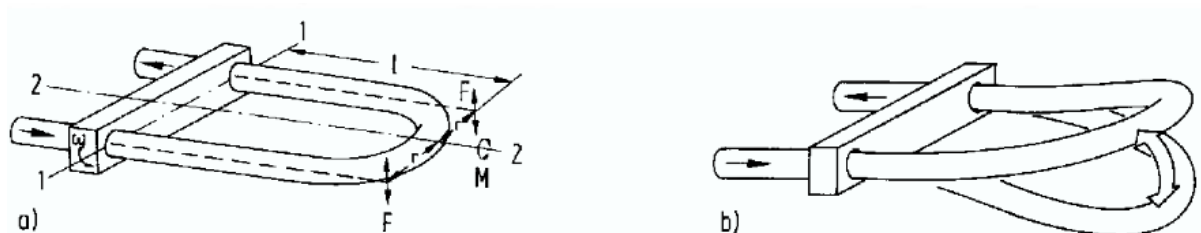
$$\alpha = \frac{M}{c} = \frac{F \cdot r}{c} = \frac{m \cdot v \cdot \omega \cdot r}{c} \quad (24)$$

Wird nun die Geschwindigkeit v mit Hilfe der Länge l der Rohrschleife und der benötigten Zeit t, welche zum Durchströmen des Rohres braucht, beschrieben, so ergibt sich:

$$\alpha = \frac{l \cdot \omega \cdot r}{c} \cdot \frac{m}{t} = k \cdot m \quad (25)$$

k ... spezifische Federkonstante

$\dot{m}$  ... Massendurchfluss



**Abbildung 6: Rohrschleife des Coriolis-Massenstrommessens**

**a) Bezeichnung**

**b) Schwingung ohne Durchfluss**

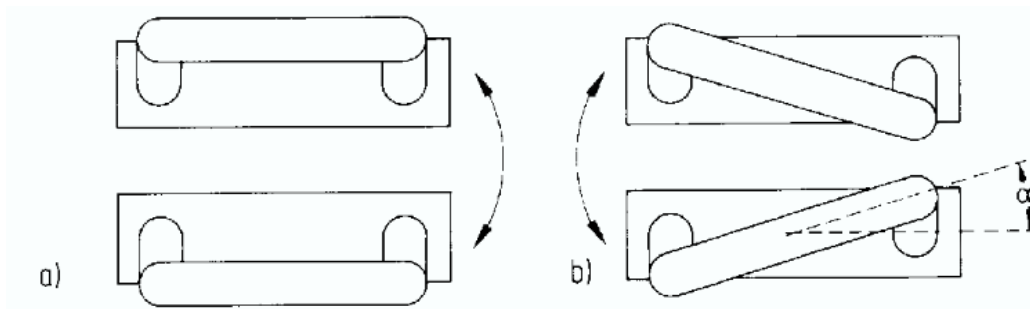


Abbildung 7: Schwingung

a) ohne Durchfluss

b) mit Durchfluss

### 2.2.17 Nennen Sie andere Durchflussmessverfahren!

- Schwebekörper-Durchflussmesser
- Magnetisch Induktive Durchflussmesser
- Ultraschall-Durchflussmesser
- Vortex-Massedurchflussmesser
- Thermische Massedurchflussmesser

### 2.2.18 analog zu 2.1.1

gegeben:

$$\begin{aligned}
 D_0 &= 0,016 \text{ m} & D_1 &= 0,0284 \text{ m} & \dot{V} &= (0,2 \leq \dot{V} \leq 1,1) \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \\
 \eta &= 1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} & \rho &= 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & v &= \frac{\eta}{\rho} & v &= 1,002 \cdot 10^{-6} \\
 \varepsilon &= 1
 \end{aligned}$$

Es gilt die Durchflussgleichung:

$$\dot{V} = \varepsilon \alpha A_0 \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \Rightarrow \Delta p = \left( \frac{\dot{V}}{\varepsilon \alpha A_0} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \quad (26)$$

Um  $\alpha$  zu bestimmen benötigen wir die Reynolds-Zahl und das Öffnungsverhältnis  $m$ 

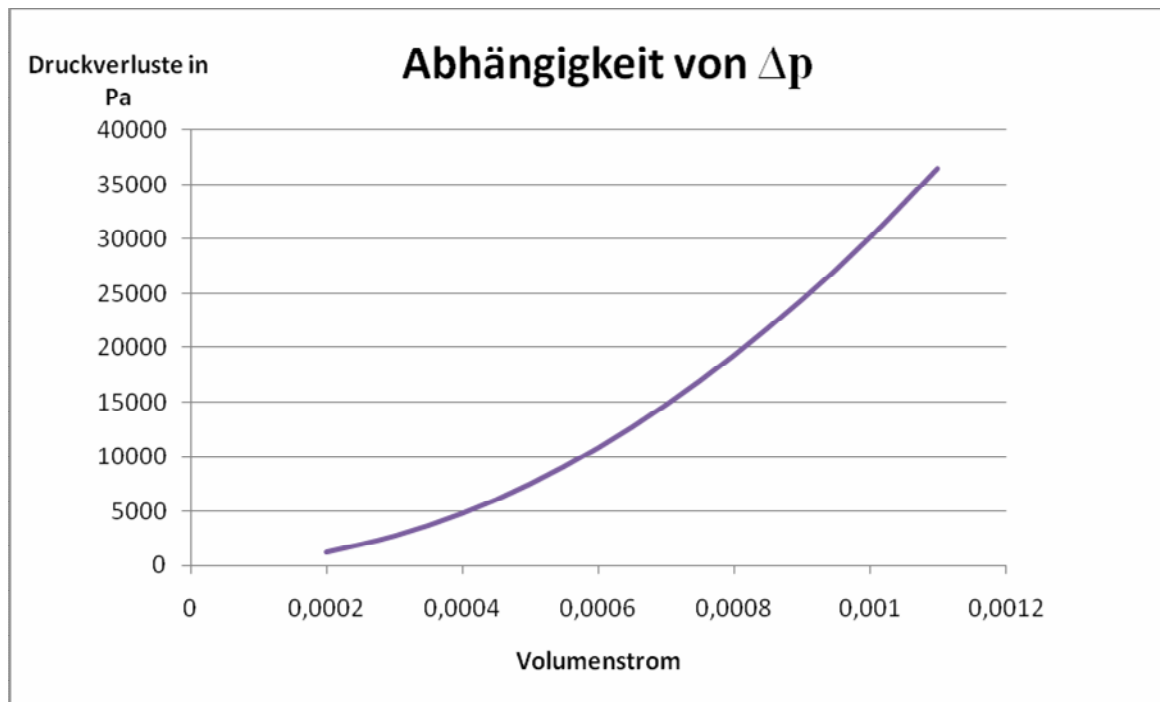
$$m = \frac{A_0}{A_1} = \frac{D_0^2}{D_1^2} = 0,317$$

$$Re = \frac{\bar{v} \cdot D}{\nu} = \frac{4 \dot{V}}{\pi D_0 \nu} = (1,588 \dots 8,736) \cdot 10^4$$

$$\overline{Re} = 5,162 \cdot 10^4$$

Mit Hilfe dem Bild 2 aus der Versuchsanleitung erhalten wir  $\alpha \approx 0,64$  und damit zur Endgleichung:

$$\Delta p \approx 3,014 \cdot 10^{10} \frac{\text{kg}}{\text{m}^7} \cdot \dot{V}^2$$

Abbildung 8: Abhängigkeit  $\Delta p = f(\dot{V})$ 

### 2.2.19 analog zu 2.1.3

Der Volumendurchfluß  $\dot{V}$  setzt sich aus dem gemessenen Volumen  $V$  und der Zeit  $t$

zusammen:  $\dot{V} = \frac{V}{t}$  daraus lässt sich der Fehler  $\Delta \dot{V}$  mit Hilfe der linearen Fehlerfortpflanzung berechnen:

Absolute: 
$$\Delta \dot{V} = \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial V} \cdot \Delta V \right| + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial t} \cdot \Delta t \right| = \frac{1}{t} \cdot \Delta V + \frac{V}{t^2} \cdot \Delta t$$

Relative: 
$$\frac{\Delta \dot{V}}{\dot{V}} = \frac{1}{t} \cdot \frac{\Delta V}{\dot{V}} + \frac{V}{t^2 \cdot \dot{V}} \cdot \Delta t \quad \text{da} \quad \dot{V} = \frac{V}{t} \text{ gilt}$$

$$\frac{\Delta \dot{V}}{\dot{V}} = \frac{1}{t} \cdot \frac{\Delta V}{\dot{V}} + \frac{V}{t^2 \cdot \frac{V}{t}} \cdot \Delta t = \frac{1}{t} \cdot \frac{\Delta V}{\dot{V}} + \frac{1}{t} \cdot \Delta t \leq 1,5 \%$$

$$\Rightarrow t_{\min} = \frac{1}{0,015} \cdot \left( \frac{\Delta V}{\dot{V}} + \Delta t \right)$$

$$t_{\min} = \frac{1}{0,015} \cdot \left( \frac{0,0001}{\dot{V}} + 1 \right)$$

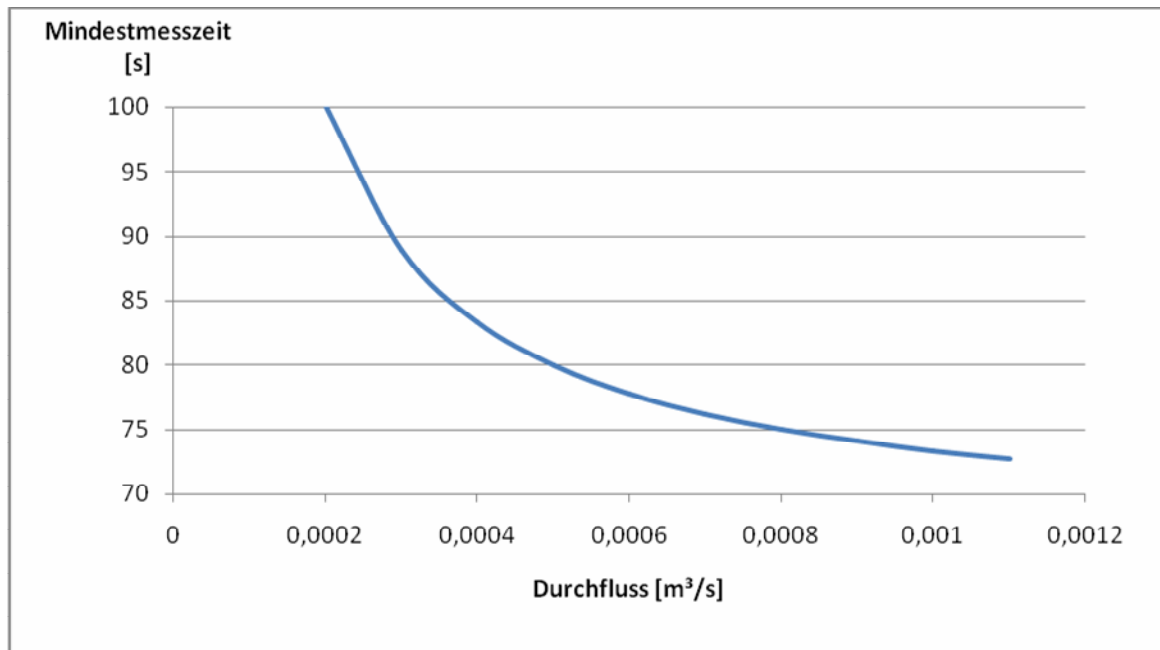


Abbildung 9: Abhängigkeit  $t_{\min} = f(\dot{V})$

### 3 Versuchsdurchführung

#### 3.1 Messdaten

Die folgenden Messdaten wurden beim Versuch erfasst:

Woltmann-zähler			Coriolis		
beim Start [m³]	nach 120s [m³]	Volumen- Differenz [m³]	Massenstrom [kg/s]	Temperatur [°C]	Druckdifferenz [kPa]
346,7439	346,7699	0,0260	0,22	24,8	1,4
347,7121	347,7416	0,0295	0,25	31,0	1,6
346,7758	346,8116	0,0358	0,30	25,4	2,5
347,6641	347,7056	0,0415	0,35	30,5	3,3
346,8178	346,8671	0,0493	0,41	26,1	4,8
347,5981	347,6527	0,0546	0,46	29,9	5,7
346,8755	346,9379	0,0624	0,51	26,7	7,5
346,9496	347,0239	0,0743	0,61	27,3	10,6
347,0747	347,1603	0,0856	0,71	28,1	14,1
347,1815	347,2809	0,0994	0,82	28,7	19,0
347,2926	347,4041	0,1115	0,92	29,2	23,7
347,4184	347,5419	0,1235	1,02	29,7	29,5

Tabelle 1: Messdaten

### 3.2 Auswertung

Mit den Messdaten haben wir nach den Gleichungen  $\rho(v) = \rho(v_0) \cdot [1 + a \cdot (v - v_0)]$ ,

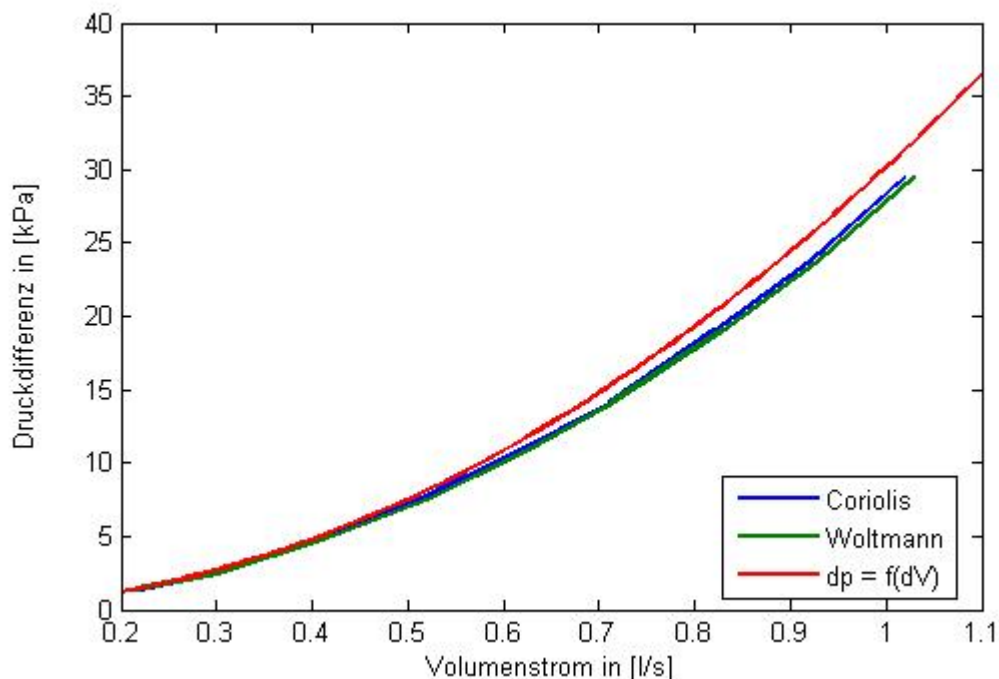
$$\dot{V} = \frac{\Delta V}{120s}, \quad \dot{V} = \frac{m}{\rho} \quad \text{und} \quad \alpha = \frac{\dot{V}}{\varepsilon \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}} \quad \text{Dichte, Volumenstrom bei Woltmann-zähler und}$$

gyroskopischem Massendurchflussmesser sowie Durchflusszahl  $\alpha$  berechnet:

$\rho$ [kg/m³]	$\dot{V}_{\text{Woltmann}}$ [m³/s]	$\dot{V}_{\text{Coriolis}}$ [m³/s]	$\alpha$ [1]
997,378277	0,0002167	0,00022058	0,6433
996,058552	0,0002458	0,00025099	0,6824
997,250562	0,0003008	0,00030083	0,6684
996,164982	0,0003458	0,00035135	0,6684
997,101561	0,0004108	0,00041119	0,6587
996,292697	0,0004550	0,00046171	0,6692
996,973846	0,0005200	0,00051155	0,6670
996,84613	0,0006192	0,00061193	0,6680
996,675843	0,0007133	0,00071237	0,6672
996,548128	0,0008283	0,00082284	0,6674
996,441698	0,0009292	0,00092329	0,6702
996,335269	0,0010292	0,00102375	0,6654

**Tabelle 2: Aus den Messdaten errechnete Größen**

Wenn man den Druckverlust über den Volumenströmen abbildet, so ergibt sich dieses Diagramm:

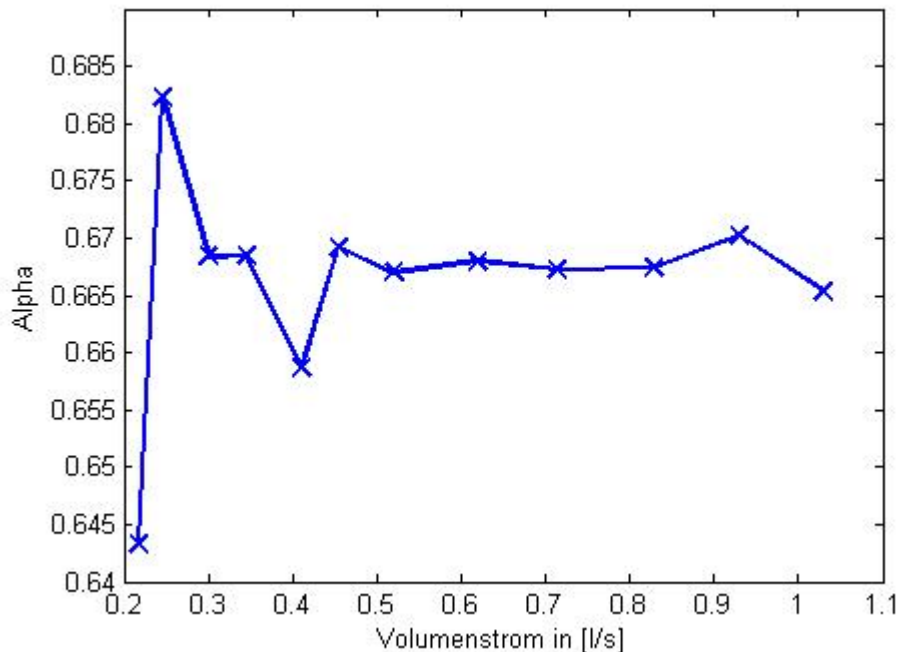


**Abbildung 10: Druckverlust in Abhängigkeit des Volumenstroms**

Hierbei stellt die rote Kurve die oben bei 2.2.18 errechnete Funktion dar.

Wie leicht zu erkennen ist, liegen die Kurven der Messdaten sehr dicht beieinander, aber die Funktion weicht bei größeren Werten stärker von den Messwerten ab. Dies liegt vor Allem daran, dass wir  $\alpha \approx 0,64$  angenommen haben. Im Experiment ist die Durchflusszahl aber nicht gleich 0,64, sondern variiert sogar.

Wenn man die Durchflusszahl Alpha über dem Volumenstrom darstellt, wird dies besonders deutlich:



**Abbildung 11: Durchflusszahl  $\alpha$  in Abhängigkeit des Volumenstroms**

Aus diesem Diagramm lässt sich keine Charakteristik für die Durchflusszahl ermitteln. Es ist aber erkennbar, dass die Abweichungen für kleine Durchflüsse besonders groß sind.

Dies rührt vom Fehler, der beim Woltmann-Zähler auftritt. Dieser ist für kleine Durchflüsse nämlich besonders groß und wird mit großen Durchflüssen geringer.

Der erste, zweite und fünfte Wert haben so große Abweichungen, dass sie als Ausreißer anzusehen sind.

Generell können wir aber die Durchflusszahl etwa zwischen 0,665 und 0,67 angeben, da die Werte für große Ströme in diesem Bereich liegen.

## 4 Literatur

- [01] Versuchsanleitung „PM4\_Volumen+Massendurchfluss“. URL: [http://www.uni-magdeburg.de/imos/mea\\_sen/welcome.html](http://www.uni-magdeburg.de/imos/mea_sen/welcome.html) (Stand: 17.04.09).