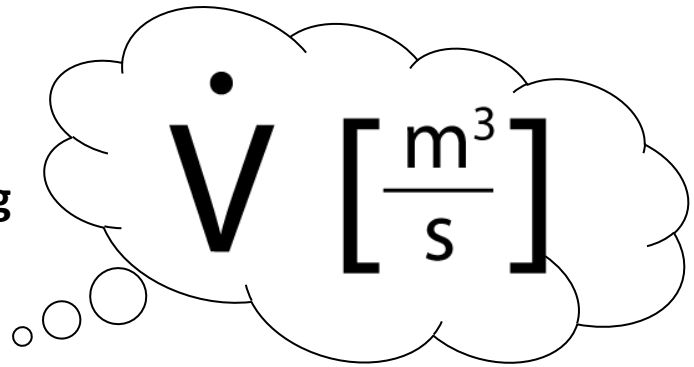


Verfahrenstechnisches Praktikum WS 2018/2019

Versuch D4: Volumenstrommessung von Gasen

Geb.: 40.13

Versuch D4: Volumenstrommessung



1 Einführung und Grundlagen

Bei technischen Prozessabläufen ist die Prozessüberwachung von zentraler Bedeutung für den korrekten Ablauf und für die Sicherheitstechnik. Sollen beispielsweise bestimmte Betriebspunkte eines Brenners angefahren werden, so muss der Volumenstrom der Luft in der Luftzufuhr bekannt sein. In vielen anderen technischen Anwendungsfällen sind Informationen über das Strömungsfeld erforderlich, wofür Geschwindigkeitsmessungen benötigt werden (z.B. im Flugzeug oder bei der Beurteilung des Mischvorgangs in einem Reaktor).

In diesem Praktikum sollen Verfahren gezeigt und angewendet werden, mit denen Volumenströme und lokale Geschwindigkeiten gemessen werden können.

2 Allgemeine Informationen zur Durchführung von Messungen

Eine Messung muss immer sorgfältig vorbereitet sein. Häufig muss das verwendete Messgerät vorher kalibriert werden, damit die Messung durchgeführt werden kann. Die gesuchte Größe kann oft nicht direkt gemessen werden, sondern muss stattdessen mithilfe physikalischer Gesetzmäßigkeiten aus anderen Messgrößen abgeleitet werden.

Mit den in diesem Praktikum vorgestellten Geräten und Verfahren findet die Messung von Volumenströmen und Geschwindigkeiten indirekt statt. Diese Geräte sind im Einzelnen:

- Rotameter
- Turbinenradzähler
- Düse
- Messblende
- Prandtl-Sonde

Im folgenden Abschnitt wird auf die theoretischen Grundlagen und die verwendeten Messverfahren eingegangen.

3 Grundlagen aus der Strömungslehre

Zum Verständnis der Messprinzipien der einzelnen Messgeräte, werden in diesem Abschnitt die grundlegenden Gesetze und Gleichungen aus der Strömungslehre erläutert. Diese sind:

- das ideale Gasgesetz,
- die Kontinuitätsgleichung,
- die Bernoulli-Gleichung.

3.1 Ideale Gasgleichung

Für ein ideales Gas gilt:

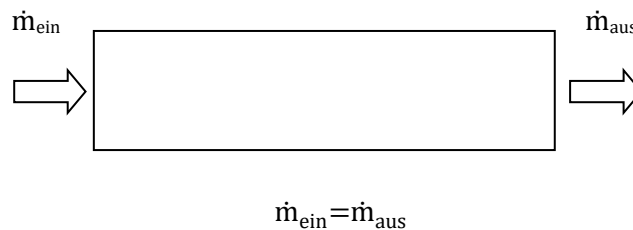
$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Sie gibt den Zustand eines idealen Gases bezüglich der Zustandsgrößen Druck p , Volumen V , Temperatur T und Stoffmenge n wieder und ist über die Definition der Stoffmenge mit der Masse m durch die Molmasse M verknüpft.

$$n = \frac{m}{M}$$

3.2 Kontinuitätsgleichung (Massenerhaltung)

Angewandt auf ein einfaches Rohr besagt die Kontinuitätsgleichung, dass der Massenfluss am Einlass des Rohres gleich dem Massenfluss an seinem Auslass sein muss:



Somit gilt für den Fall konstanter Dichte ρ auch:

$$\rho \dot{V}_{\text{ein}} = \rho \dot{V}_{\text{aus}} \quad \text{für } \rho = \text{const.}$$

Und

$$\rho u_{\text{ein}} A_{\text{ein}} = \rho u_{\text{aus}} A_{\text{aus}}$$

Wobei

$$u_{\text{ein}} = \text{Geschwindigkeit am Einlass}$$

$$A_{\text{ein}} = \text{Einlassquerschnittsfläche}$$

$$u_{\text{aus}} = \text{Geschwindigkeit am Auslass}$$

$$A_{\text{aus}} = \text{Auslassquerschnittsfläche}$$

3.3 Bernoulli-Gleichung (für reibungsfreie, inkompressible Strömungen, Energieerhaltung: mechanisch)

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + p + \rho g z = \text{const.}$$

p : statischer Druck

ρ : Dichte (in der Gleichung nicht mit p verwechseln!)

g : Erdbeschleunigung

z : Höhe im Potentialfeld, hier senkrecht zur Erdbeschleunigungsrichtung

Der erste Summand $\frac{1}{2}\rho u^2$ wird als der dynamische Druck bezeichnet, während p den statischen Druck beschreibt. Die Summe aus dynamischen und statischen Druck wird als Totaldruck bezeichnet. Die grundlegende Aussage der Bernoulli-Gleichung ist, dass die Energie eines Fluides erhalten bleibt. Auf einer horizontalen Ebene im Schwerfeld besagt diese Gleichung, dass der statische Druck in den dynamischen Druck umgewandelt werden kann (umgekehrt genauso). Als Beispiel erfolgt hierfür sinkt bei der Querschnittsverengung eines Rohres der statische Druck und die Strömung wird beschleunigt.

Im Praktikum wird ein wichtiger Anwendungsfall dieser Gleichung veranschaulicht: Die Berechnung der Austrittsgeschwindigkeit einer Düse. Für diese wird im Gegensatz z.B. zum Ausfließen aus einem Behälter angenommen, dass $z_1=z_2$ gilt (horizontale Lage der Düse). Unter Verwendung der Kontinuitätsgleichung

$$\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2$$

und der Annahme einer inkompressiblen Expansion ($\rho = \text{const.}$), lässt sich folgender allgemeinere Zusammenhang für die mittlere Austrittsgeschwindigkeit aus der Düse herleiten:

$$u_2 = \sqrt{\frac{\alpha \cdot 2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}}$$

Vorbereitung: Es wird empfohlen, sich diesen Zusammenhang selbst aus der Bernoulli- und Kontinuitätsgleichung unter der Annahme konstanter Dichte herzuleiten.

Bei α handelt es sich um eine Konstante, die dem Impulsverlust infolge von Reibung Rechnung trägt. Dieser Druckverlust ist für eine Düse typischerweise sehr klein (ca. $\alpha = 0,98$).

3.4 Normvolumenstrom

Bei der Messung von Volumenströmen in einem Punkt i werden die gemessenen Werte häufig auf einen Normvolumenstrom umgerechnet. Dieser gibt an, wie groß der entsprechende Volumenstrom unter Normbedingungen ist. Der Normvolumenstrom wird folgendermaßen berechnet (Diese Umrechnung gilt exakt für ideale und näherungsweise auch für reale Gase bei moderaten Drücken):

$$\dot{V}_N = \dot{V}_i \cdot \frac{T_N}{T_i} \cdot \frac{p_i}{p_N}$$

Vorbereitung: Aus welchem Zusammenhang leitet sich diese Formel ab? (Tipp: Ideales Gas)

Die Normbedingungen sind $T_N = 273 \text{ K}$ und $p_N = 1013,25 \text{ mbar}$. Gemessene Volumenströme werden auf Normbedingungen umgerechnet, damit sie untereinander vergleichbar sind. Bei der Angabe des Volumenstroms bei anderen Bedingungen **muss** der zugehörige Betriebspunkt (Druck und Temperatur) mit angegeben werden (für kompressible Medien wie Luft)!

Im deutschsprachigen Raum und vor allem am KIT wird der Volumenstrom meist mit einem „V-punkt“ abgekürzt. V steht hierbei für das Volumen. Der Punkt darauf gibt an, dass es sich hierbei um eine Stromgröße handelt („Größe-pro-Zeit“), was nichts anderes als die zeitliche Änderungsrate ist. Diese wird in der Physik üblicherweise mit einem Punkt abgekürzt.

3.5 Grundlagen zu den Funktionsweisen der verwendeten Messgeräte

3.5.1 Rotameter

Ein Rotameter besteht aus einer vertikal ausgerichteten Glas- oder Kunststoffröhre, welche nach oben im Durchmesser stetig zunimmt. In dieser Röhre befindet sich ein Schwebekörper, welcher sich frei in der Röhre bewegen kann. Eine vorbeifließende Strömung bringt den Schwebekörper dazu, in der Röhre aufzusteigen (siehe Abbildung 1).

Der Schwebekörper steigt dabei solange auf, bis sich die ringförmige Querschnittsfläche zwischen dem Schwebekörper und der Röhre auf den Wert vergrößert hat, bei dem ein dynamisches Gleichgewicht zwischen den auf den Schwebekörper wirkenden Kräften entsteht. Dies ist einerseits die Widerstandskraft F_R sowie die Auftriebskraft F_A , andererseits die auf den Körper wirkende Gewichtskraft F_G (siehe Abbildung 2, linker Teil). Die Höhe, in der sich der Schwebekörper befindet ist ein Maß für den Volumenstrom. Das Rotameter muss vor der Messung für einen definierten Druck am Rotameter kalibriert werden. Die Messspanne beträgt dabei üblicherweise 12:1 mit einer Messabweichung von 1 %. Eine entsprechende Kalibriergerade ist in Abbildung 1 (rechter Teil) dargestellt.

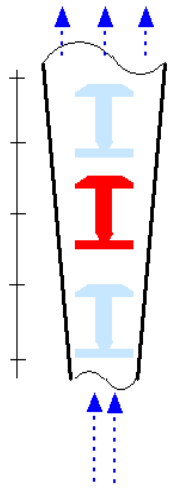


Abbildung 1: Rotameter

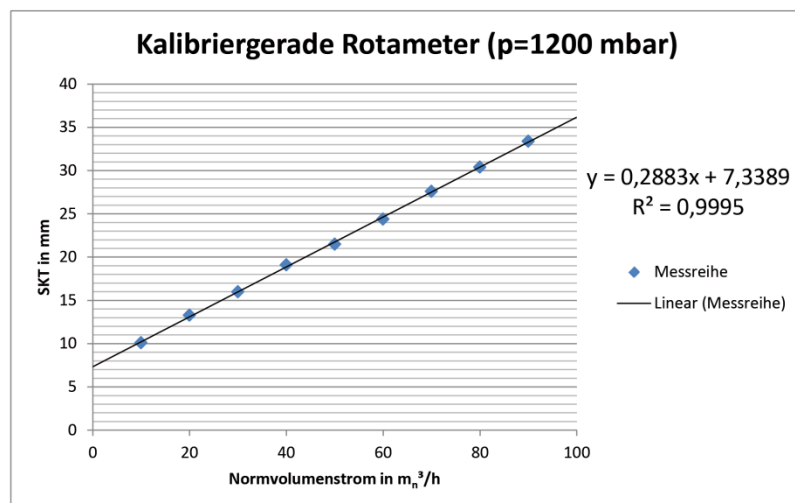
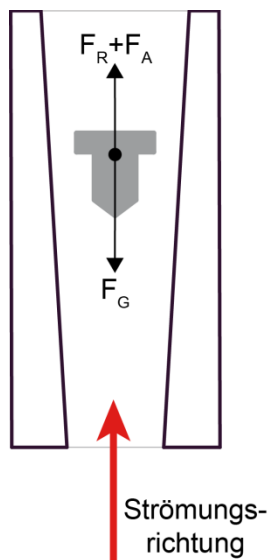


Abbildung 2: Kräftebilanz um den Schwebekörper eines Rotameters (links) sowie die Kalibriergerade eines Rotameters (rechts)

3.5.2 Turbinenradzähler

Eine Möglichkeit zur Messung von durchströmenden Volumen stellt ein Turbinenradzähler dar, wie er beispielsweise in jedem Haushalt als Wasseruhr verbaut ist. Zwar gibt es Turbinenradzählern in vielen verschiedenen Konstruktionsvarianten, jedoch sie basieren alle auf dem gleichen Prinzip:

Ein Fluid fließt durch ein Rohr und trifft auf die Schaufel der im Turbinenradzähler verbauten Turbine, die sich aufgrund der durch die Strömung verursachten Kräfte beginnt zu drehen. Die Umdrehungen der Turbine sind dabei das Maß für das durchströmte Volumen beziehungsweise im Falle einer stationären Strömung ist die Drehzahl ein Maß für den Volumenstrom. Die Messspanne liegt üblicherweise im Bereich von 20:1 und die Messgenauigkeit bei ca. +/- 0,5 %.

3.5.3 Volumenstrommessung mit einer Düse

Eine Düse ist ein sehr einfaches, kostengünstiges und vor allem wartungsfreies Instrument zur Messung von Volumenströmen. Durch die Querschnittsveränderung wird die Strömung beschleunigt, während gleichzeitig eine Messung des Drucks an den Punkten 1 und 2 stattfindet.

Die Geschwindigkeit u_2 wird nach unten stehender Gleichung bestimmt, welche in Abschnitt 3.3 aus der Bernoulli-Gleichung mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung hergeleitet wurde:

$$u_2 = \sqrt{\frac{\alpha \cdot 2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)}}$$

Die Berechnung des Volumenstroms erfolgt anschließend mit der Düsenaustrittsfläche A_2 :

$$\dot{V}_2 = u_2 \cdot A_2$$

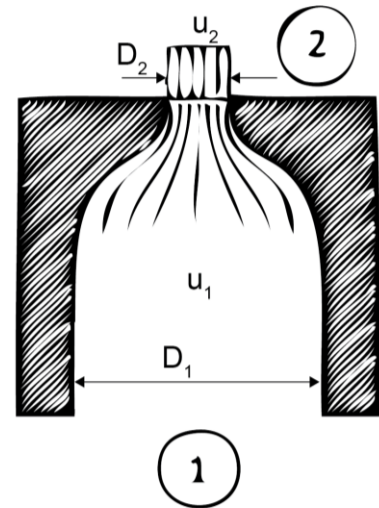


Abbildung 3: Düse

3.5.4 Volumenstrommessung mit einer Messblende

Bei der Messung des Volumenstroms mittels einer Messblende wird ein Teil des Rohrquerschnitts durch die Blende versperrt. Hierdurch entsteht ein Druckverlust im Rohr, welcher vom Volumenstrom abhängt und durch Messung des Relativdruckes vor (1) und nach der Blende (2) bestimmt werden kann.

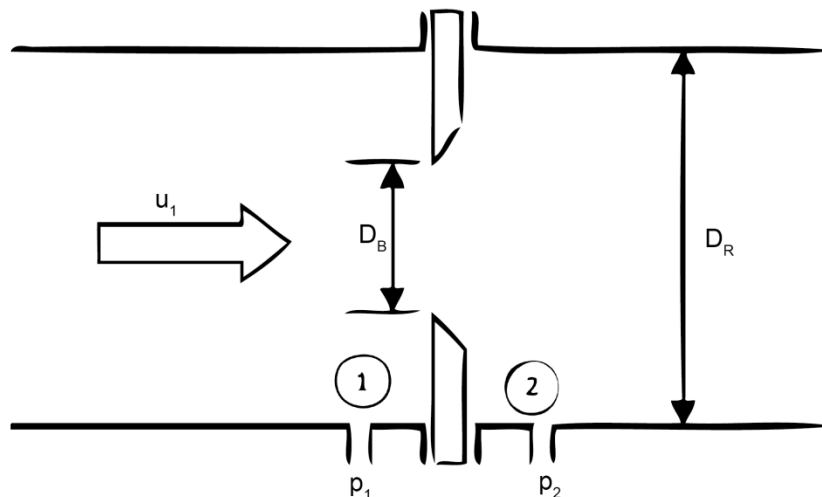


Abbildung 4: Kanal mit eingebauter Messblende

Der Volumenstrom berechnet sich im Anschluss aus der Druckdifferenz $\Delta p = p_1 - p_2$ nach folgender Formel:

$$\dot{V} = \frac{\pi \cdot C}{4 \cdot \sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \varepsilon_1 \cdot D_B^2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}$$

Dabei handelt es sich bei C um einen Durchflusskoeffizienten, welcher für die entsprechende Blende tabelliert ist und vom Durchmesserverhältnis β und der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Das Verhältnis der Durchmesser von Blende zum Rohr ist definiert als $\beta = D_B/D_R$. Weiterhin beschreibt ε die Kompressibilität des Gases mit Hilfe des Isotropenexponenten des durchströmenden Gases ($\kappa_{\text{Luft}} = 1,4$) und wird wie folgt berechnet:

$$\varepsilon_1 = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot \beta^4) \frac{\Delta p}{\kappa \cdot p_1}$$

3.5.5 Prandtl-Sonde

Eine Prandtl-Sonde stellt einen Staukörper dar, der zur Durchführung von Messungen in die Strömung eingebracht sind. In der Prandtl-Sonde wird am Staupunkt und an der äußeren Wand der Druck gemessen.

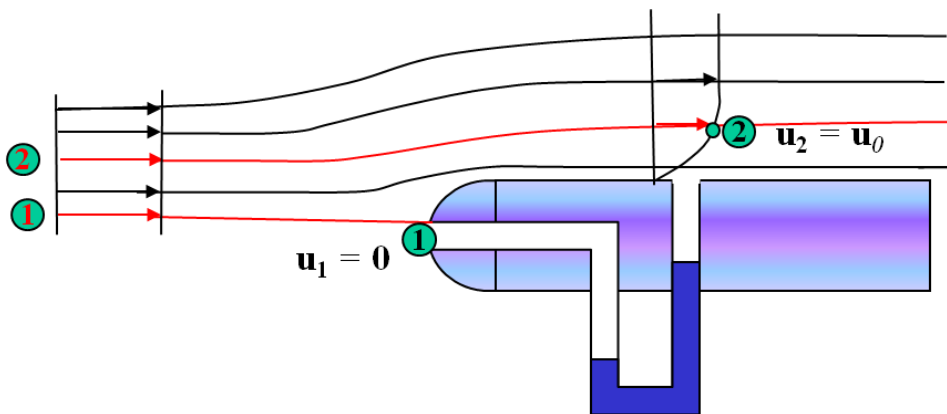


Abbildung 5: Prandtl-Sonde mit Strömungsfeld

Im Staupunkt ist die Geschwindigkeit $u_1 = 0$ und der vorher vorhandene dynamische Druck wird entlang der Stromlinie (1) verlustfrei in statischen Druck umgewandelt. An dieser Stelle wird demnach der Totaldruck der Anfangswerte gemessen.

In der Stromlinie (2), die parallel zur Wand und außerhalb der Grenzschicht verläuft sind p und u identisch mit den Anfangswerten. Im Gegensatz zu einem Staupunkt ist der Druck in der Wandgrenzschicht trotz der Reduzierung der Geschwindigkeit konstant (Wandreibungsverluste). Daher entspricht der statische Druck an der zweiten Messstelle dem Druck in der Stromlinie (2) und somit dem statischen Druck der Anfangswerte.

Durch die Kenntnis des Totaldruckes und des statischen Druckes der Anfangswerte kann nun die Geschwindigkeit errechnet werden.

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + p_{\text{statisch}} = p_{\text{total}}$$

$$\rightarrow u_0 = u_2 = \sqrt{\frac{2(p_{\text{total}} - p_{\text{statisch}})}{\rho}}$$

Für Vorbereitung und Protokoll: Was muss für das Strömungsfeld gelten, damit die Prandtl-Sonde korrekt verwendet werden kann? Funktioniert das auch bei Drallströmungen (Der Geschwindigkeitsvektor weist neben der axialen Komponente noch andere auf, wie z.B. in radialer Richtung)

4 Versuchsdurchführung

4.1 Volumenstrommessung

Das Rotameter muss zunächst kalibriert werden. Dabei wird ermittelt, welcher Volumenstrom sich bei den jeweiligen Skalenwerten einstellt. Hierbei ist unbedingt zu beachten, dass der Druck im Rotameter bei jeder Messung gleich bleibt. Um das Rotameter zu kalibrieren, wird der Volumenstrom mit dem Turbinenradzähler, der Messblende und der Düse gemessen. Schalten Sie zunächst das Rotameter und den Turbinenradzähler in Reihe und danach gleichermaßen das Rotameter und die Düse. Um die erhaltenen Werte zu überprüfen, sollen die gemessenen Volumenströme in Normvolumenströme umgerechnet werden und in einem Diagramm verglichen werden.

4.2 Lokale Geschwindigkeitsmessung mit der Prandtl Sonde

Die lokalen Geschwindigkeiten eines Freistrahls sollen mittels einer Prandtl-Sonde bestimmt werden. Dafür wird die gleiche Düse wie im vorherigen Versuch verwendet. Als Freistrahls wird die von außen ungestörte Strömungsausbreitung nach dem Düsenaustritt bezeichnet. Je nach Abstand vom Düsenaustritt lassen sich verschiedene Bereiche charakterisieren. Der sogenannte Ähnlichkeitsbereich eignet sich sehr gut, um prinzipielle Strömungsphänomene zu untersuchen. Der typische Öffnungswinkel im Ähnlichkeitsbereich liegt bei ca. 19°.

Vorbereitung: Schätzen Sie den radialen Abstand für die Freistrahlgrenze einer der Entfernung 70 mm und 140 mm vom Düsenaustritt ab.



Abbildung 6: Prandtl-Sonde

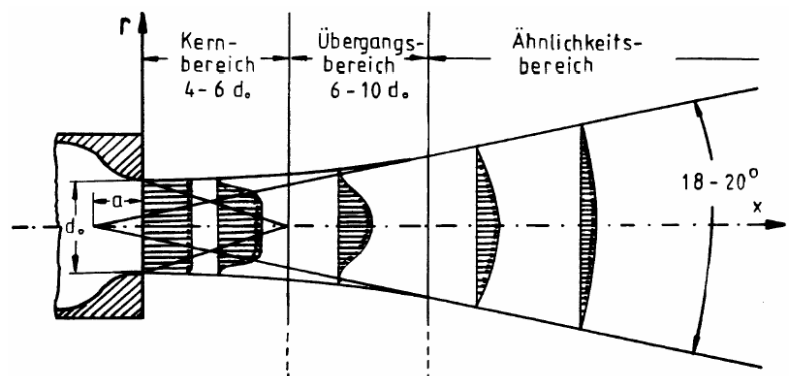


Abbildung 7: Geschwindigkeitsprofile im Freistrahls

Hinweise zum Protokoll werden am Ende des Kolloquiums ausgeteilt.