

Institut für Fluid- und Thermodynamik

Lehrstuhl für Strömungsmechanik

Prof. Dr.-Ing. Holger Foysi



Messtechnik-Labor SoSe2020

Versuch V5

Messung von Volumen- und Massenstrom

Gruppe: _____

Name	Vorname	Matrikel-Nr.

Tag des Versuchs: _____

Korrekturhinweis: _____

Endtestat: _____

Inhalt

1	Grundlagen zur Messung von Volumen- und Massenstrom	3
1.1	Grundbegriffe der Strömungsmechanik	3
1.1.1	Inkompressibilität	3
1.1.2	Druck	3
1.1.3	Druckangaben	4
1.1.4	Stromlinien	5
1.1.5	Stationäre Strömung	5
1.1.6	Stromfaden und Stromröhre	6
1.1.7	Grundgleichungen der Stromfadentheorie	6
1.1.8	Verschiedene Druckbegriffe in Strömungen und deren Messung	7
1.1.9	Laminare und turbulente Strömung	10
1.1.10	Grenzschicht	11
1.1.11	Rohrströmung	11
1.2	Druckmessgeräte	13
1.2.1	U-Rohrmanometer	13
1.2.2	Schrägrohrmanometer	14
1.2.3	Betz-Manometer	14
1.2.4	Quecksilber-Barometer	15
1.2.5	Elektromechanische Druckmessgeräte	16
2	Durchflussmessverfahren	18
2.1	Wichtige Volumenstrommessverfahren	18
2.2	Wichtige Massenstrommessverfahren	18
3	Volumenstrommessverfahren	18
3.1	Netzmessung allgemein	18
3.2	Wirkdruckverfahren allgemein	19
3.2.1	Messblende	20
3.2.2	Düse	23
4	Versuchsaufbau	23
5	Versuchsdurchführung	24
6	Auswertung Messerwerte	25
6.1	Dichtebestimmung	25
6.2	Berechnung des Volumenstroms an der Messblende	25
6.3	Einlaufdüse	25
6.4	Berechnung des Volumenstroms anhand der Netzmessung	26
7	Versuchsprotokoll	27
8	Fragen vor der Versuchsdurchführung	28
9	Literatur	29
10	Anhang	29

1 Grundlagen zur Messung von Volumen- und Massenstrom

Für den geregelten Betrieb sehr vieler technischer Anlagen ist die Messung von **Durchflussmengen in Rohrleitungen** oder **Kanälen** unerlässlich (z. B. in Raffinerien, Chemiewerken, Kraftwerksanlagen, Pipelines, Klimatechnischen Anlagen etc.). Der Laborversuch „Messung von Volumen- und Massenstrom“ soll einen kleinen Einblick in verschiedene Messmethoden liefern. Allerdings erfordert der Versuch ein gewisses Maß an strömungsmechanischen Grundkenntnissen. Da zum einen das Messtechniklabor gemäß Studienverlaufsplan parallel zu den Vorlesungen „Strömungslehre“ und „Einführung in die Fluid- und Thermodynamik“ stattfindet, zum anderen manche Studenten das Labor vorzeitig absolvieren, ist der Kenntnisstand über die Strömungsmechanik bei den meisten Studenten erfahrungsgemäß noch gering. Deswegen behandelt das Kapitel 1.1 stark verkürzt die wichtigsten strömungsmechanischen Grundlagen, die zur Durchführung des Laborversuchs nötig sind. Studenten, die entsprechende Vorlesungen schon besucht haben, können mit der Versuchsvorbereitung ab Kapitel 1.2 starten.

1.1 Grundbegriffe der Strömungsmechanik

Die Strömungsmechanik beschäftigt sich mit der Bewegung **gasförmiger** und **flüssiger Medien**. Gase und Flüssigkeiten werden unter dem Sammelbegriff **Fluide** zusammengefasst. Daraus ergibt sich auch der zur Strömungsmechanik gleichbedeutende Begriff Fluidodynamik. Die Strömungsmechanik ist ein Teilgebiet der klassischen **Kontinuumsmechanik**. Das heißt, wir interessieren uns zunächst nicht für die Bewegungen einzelner Moleküle, sondern betrachten ein Fluid als einen deformierbaren Körper mit einer kontinuierlichen Verteilung von Masse und physikalischen Eigenschaften.

1.1.1 Inkompressibilität

Im Rahmen dieser kurzen Einleitung, beschränken wir uns auf die Behandlung **inkompressibler Strömungen**. Der Begriff inkompressible Strömung besagt, dass die **Dichte** ρ des Fluids (Masse pro Fluidvolumen) innerhalb einer Strömung **unveränderlich** ist. Der Begriff inkompressible Strömung darf nicht mit einem **inkompressiblen Fluid** verwechselt werden. Ein inkompressibles Fluid zeigt unabhängig vom wirkenden Druck nahezu keine Dichteänderungen. Dies trifft auf Flüssigkeiten wie z. B. Wasser zu. Gasförmige Fluide wie beispielsweise Luft sind sehr wohl kompressibel. Wenn aber Strömungsgeschwindigkeiten in einer gasförmigen Strömung gering sind, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Dichte des Gases nicht ändert. Unterhalb einer Machzahl $Ma < 0,3$ können wir eine gasförmige Strömung als inkompressible Strömung behandeln, ohne große Fehler zu begehen. Die Machzahl ist als Quotient der lokalen Strömungsgeschwindigkeit durch die Schallgeschwindigkeit definiert. Da die Schallgeschwindigkeit in Luft bei üblichen Umgebungsbedingungen etwa 340 m/s beträgt, können Strömungen von Luft mit lokalen Geschwindigkeiten von bis zu 100 m/s als inkompressibel betrachtet werden.

1.1.2 Druck

Eine sehr wichtige physikalische Größe der Strömungsmechanik ist der **statische Druck** p . Als Druck bezeichnen wir die senkrecht auf eine Fläche dA wirkende Kraft dF_n (Normalkraft) $p = dF_n/dA$. Die SI-Einheit des Drucks ist das Pascal ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$; $1 \text{ bar} = 100.000 \text{ Pa}$). Der Druck ist kein Vektor, sondern eine skalare Größe. Er wirkt gleichmäßig in alle Raumrichtungen. Dies lässt sich an einem einfachen Beispiel verdeutlichen. Wir betrachten ein zylinderförmiges Gefäß. Es ist mit Luft gefüllt und wird mit einem Kolben mit der Querschnittsfläche A abgeschlossen (Abb. 1.1). Die Luft befinde sich in Ruhe. Auf den Kolben wirke die Kraft F . Dann beträgt der statische Druck im Zylinder $p = F/A$. Der Druck herrscht in jedem Punkt des Behälters und wirkt gleichmäßig auf alle Innenwände.

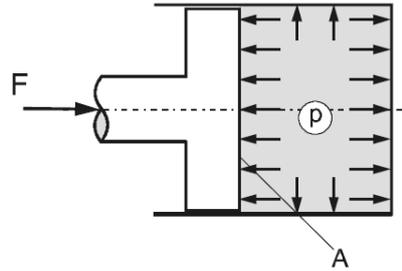


Abb. 1.1 Statischer Druck in einem mit Gas gefüllten, geschlossenen Gefäß

Betrachten wir nun ein zweites Beispiel. In einem offenen Gefäß befindet sich eine inkompressible Flüssigkeit. Die Flüssigkeit sei ebenfalls in Ruhe. Wenn wir an verschiedenen Tiefen den statischen Druck messen, werden wir erkennen, dass sich der Druck mit zunehmender Tiefe erhöht. Dies hat jeder schon erfahren, der einmal auf den Boden eines Schwimmbeckens getaucht ist. Es gibt eine **lineare Beziehung** zwischen der Tiefe h und dem statischen Druck p :

$$p = \rho \cdot g \cdot h + p_0 \quad (1.1)$$

Dabei ist ρ die Dichte der inkompressiblen Flüssigkeit und g die Erdbeschleunigung. Der Druck p_0 ist der Druck, der auf die Flüssigkeitsoberfläche einwirkt. In unserem Beispiel ist es der atmosphärische Luftdruck. In geschlossenen Gefäßen kann es auch der Druck eines über der Flüssigkeit befindlichen Gases sein (Beispiel geschüttelte Mineralwasserflasche). Bewegen wir uns auf einer Ebene, die um h unter dem Flüssigkeitsspiegel liegt, herrscht überall auf der Ebene ein gleich großer statischer Druck (Abb. 1.2).

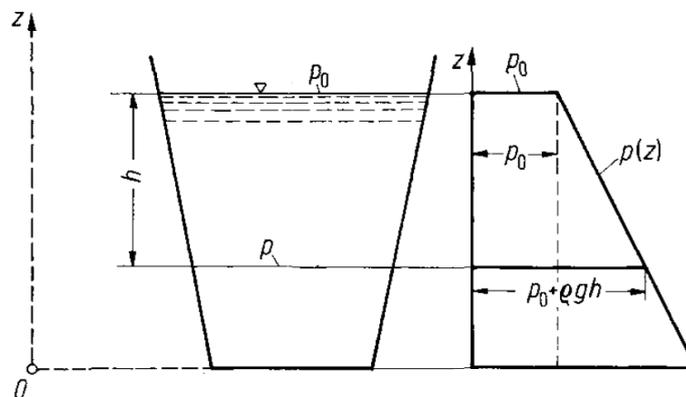


Abb. 1.2 Statischer Druck in einer Flüssigkeit

Vergleichen wir beide Beispiele, erkennen wir, dass der **statische Druck von ruhenden Gasen** unabhängig vom Ort gleich groß ist. Bei **ruhenden Flüssigkeiten** bestimmt die **Höhe der Flüssigkeitssäule** über dem Messort den statischen Druck. Prinzipiell gibt es auch eine Höhenabhängigkeit des statischen Drucks bei Gasen (siehe Luftdruck in der Erdatmosphäre). Diese Abhängigkeit ist aber erst bei sehr großen Höhenunterschieden bemerkbar und kann daher i. d. R. bei technischen Anwendungen vernachlässigt werden.

1.1.3 Druckangaben

Wird der statische Druck gegenüber dem Druck im Vakuum, der bekanntlich gleich Null ist, gemessen, nennen wir diesen Druck **Absolutdruck**. Ein klassisches Beispiel für einen Absolutdruck ist der atmosphärische Umgebungsdruck. Er liegt unter Normbedingungen bei etwa $p_{atm} \approx 100000 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$. Abweichungen treten durch Höhenlage über dem Meeresspiegel und

Wetterbedingungen auf. Häufig werden bei technischen Anwendungen lediglich **Differenzdrücke**, auch **Relativdrücke** genannt, benötigt. Deswegen messen auch die meisten Druckmessgeräte nur Differenzdrücke, auch weil deren Herstellung einfacher ist als bei Geräten zur Absolutdruckmessung. Weist ein Druckmessgerät zwei Druckanschlüsse auf, handelt es sich meist um einen Differenzdruckmesser. Der Differenzdruck ergibt sich aus dem am Messgerät „angeschlossenen“ Absolutdruck minus eines Bezugsdrucks. Häufig ist der Bezugsdruck der atmosphärische Umgebungsdruck. In diesem Fall nennen wir den Differenzdruck abhängig vom Vorzeichen **Über-** oder **Unterdruck**. Zur Verdeutlichung betrachten wir einen Fahrradreifen. Ist der Reifen „komplett platt“, liegt im Inneren der atmosphärische Umgebungsdruck von etwa 1 bar vor. Wir schließen eine Luftpumpe mit Druckanzeige an das Fahrradreifenventil an. Die Anzeige wird den Wert 0 bar angeben, da an der Luftpumpe nur der Überdruck gemessen wird. Nun pumpen wir den Reifen solange auf, bis die Anzeige einen Druck von $2,5 \text{ bar}$ angibt. Der Absolutdruck im Reifen beträgt dann $3,5 \text{ bar}$.

1.1.4 Stromlinien

Bis jetzt haben wir ausschließlich ruhende Fluide betrachtet. Das ist für den ambitionierten Ingenieur zu langweilig. Wir führen die Strömungsgeschwindigkeit ein. Sie bekommt üblicherweise die Buchstaben u, v, w oder c als Formelzeichen zugewiesen.

Eine **Strömung** können wir als eine lückenlose Ansammlung sich **bewegender infinitesimal kleiner Fluidelemente** betrachten. Wir machen gedanklich eine Momentaufnahme einer Strömung. Dann können wir jedem der infinitesimal kleinen Fluidelemente an jedem Ort der Strömung einen **Geschwindigkeitsvektor** zuweisen. Nun zeichnen wir Kurven durch die Momentaufnahme der Strömung. Diese Kurven verbinden die Fluidelemente so, dass deren Geschwindigkeitsvektor immer **tangential** an der Kurve anliegen (Abb. 1.3). Solche Kurven nennen wir **Stromlinien**. Die Stromlinien werden sich niemals kreuzen und haben in inkompressiblen Strömungen keinen Knick.

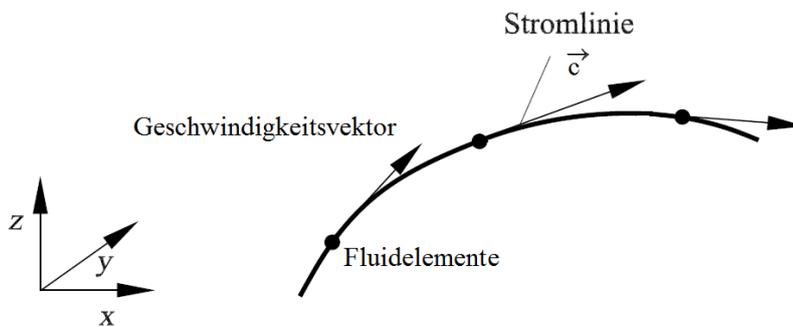


Abb. 1.3 Stromlinien und Geschwindigkeitsvektoren

1.1.5 Stationäre Strömung

Wir bezeichnen eine Strömung als **stationär**, wenn die Geschwindigkeitsänderung eines infinitesimal kleinen Fluidelements **nicht von der Zeit abhängt**, sondern **nur vom Ort**. Ein kleines Beispiel soll dies verdeutlichen. Wir betrachten die Strömung durch einen Gartenschlauch mit angeschlossener Düse. Durch den Schlauch soll pro Zeiteinheit immer das gleiche Volumen Wasser fließen. Diese Größe nennen wir **Volumenstrom** \dot{V} . Seine Einheit ist m^3/s . Wir verfolgen die Bewegung eines Fluidelements dieses Volumenstroms innerhalb der Düse. Am Düseneintritt hat das Fluidelement die Geschwindigkeit c_1 . Da sich in der Düse der durchströmte Querschnitt verkleinert, wird die Strömung beschleunigt. Folglich hat das Fluidelement am Düsenaustritt die Geschwindigkeit c_2 , mit $c_2 > c_1$. Das Fluidelement hat also seine Geschwindigkeit verändert, während es sich von Ort 1 nach Ort 2 bewegt hat. Wir warten fünf Minuten, wählen dann wieder ein Fluidelement aus und verfolgen dessen

Bewegung durch die Düse. Dieses Fluidelement wird die gleiche Geschwindigkeitsänderung erfahren, wie das zuvor betrachtete, obwohl wir beide Fluidelemente zu vollkommen verschiedenen Zeitpunkten beobachtet haben.

Aus den Erkenntnissen des obigen Beispiels lässt sich ableiten, dass Momentanaufnahmen von Stromlinienbildern in einer stationären Strömung unabhängig vom Zeitpunkt der Aufnahme immer gleich aussehen werden. Stromlinien in stationären Strömungen sind Kurvenbahnen, auf denen sich die Fluidelemente bewegen. **Wir werden uns nur mit stationären Strömungen befassen.**

1.1.6 Stromfaden und Stromröhre

Fassen wir mehrere **nebeneinander verlaufende Stromlinien**, die durch eine **gedachte Fläche A** treten, zu einem **Bündel** zusammen, erhalten wir einen sogenannten **Stromfaden** (Abb. 1.4). Der Stromfaden hat die Eintrittsfläche A_1 und die Austrittsfläche A_2 .

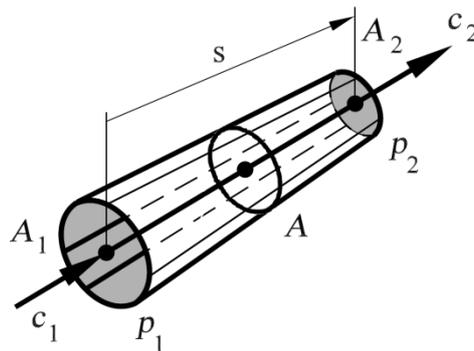


Abb. 1.4 Stromfaden

Die Mantelfläche des Stromfadens wird **Stromröhre** genannt. Da die Stromröhre aus Stromlinien besteht und wir aus den obigen Abschnitten wissen, dass die Geschwindigkeitsvektoren der Fluidelemente tangential an den Stromlinien liegen, können wir daraus folgern, dass über die Mantelfläche keine Masse bzw. kein Volumenstrom hindurchtreten kann. Da wir nah nebeneinander verlaufende Stromlinien betrachten, können wir außerdem annehmen, dass verschiedene **physikalische Größen**, wie Geschwindigkeit, Druck oder Dichte **über der Fläche A konstant** sind (A_1 und A_2 müssen nicht gleich groß sein!). Änderungen physikalischer Größen treten bei stationären Strömungen nur noch längs des Stromfadens auf. Es handelt sich damit um eine **eindimensionale Strömung**.

1.1.7 Grundgleichungen der Stromfadentheorie

Wenn durch die Mantelfläche der Stromröhre kein Volumenstrom möglich ist, kann dieser nur durch die Eintritts- und die Austrittsfläche hindurchtreten. Da wir eine **stationäre inkompressible Strömung** voraussetzen, muss der durch den Stromfaden fließende Volumenstrom **konstant** sein.

$$\dot{V} = c \cdot A = \text{konst.} \quad (1.2)$$

Dies ist die sogenannte **Kontinuitätsgleichung für inkompressible stationäre Strömung**. Vereinfacht formuliert besagt sie, dass die Menge Fluidvolumen pro Zeiteinheit, die bei A_1 in den Stromfaden eintritt, gleichzeitig bei A_2 wieder herausfließen muss (Massenerhaltung).

$$\dot{V}_1 = c_1 \cdot A_1 = c_2 \cdot A_2 = \dot{V}_2 \quad (1.3)$$

Eine Beziehung für Druck und Geschwindigkeit zwischen Eintritts- und die Austrittsfläche des Stromfadens liefert die **Bernoulli-Gleichung**. (Auf die Herleitung aus der Impulserhaltung verzichten wir aufgrund des Aufwandes):

$$p + \frac{\rho}{2} \cdot c^2 + \rho \cdot g \cdot z = konst. \quad (1.4)$$

Die Konstante auf der rechten Seite der Gleichung wird gelegentlich Bernoulli-Konstante genannt. Für zwei beliebig gewählte Punkte im Stromfaden kann geschrieben werden (z. B. für die Eintritts- und Austrittsfläche):

$$p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot c_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_1 = p_2 + \frac{\rho}{2} \cdot c_2^2 + \rho \cdot g \cdot z_2 \quad (1.5)$$

Diese Beziehung ist eine vereinfachte Form der allgemeinen Bernoulligleichung. Die Gleichungen (1.2) bis (1.5) gelten nur für den **stationären, inkompressiblen und reibungsfreien** Fall.

Dabei ist p der statische Druck an den gewählten Punkten und z die Höhe zu einem frei wählbaren Bezugsniveau (Abb. 1.5). Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass ein statischer Druck nicht nur in ruhenden Fluiden existiert, sondern auch in jedem Punkt einer Strömung ein statischer Druck vorhanden ist. Er nimmt aber abhängig von Strömungsgeschwindigkeit und Höhenlage veränderliche Werte an.

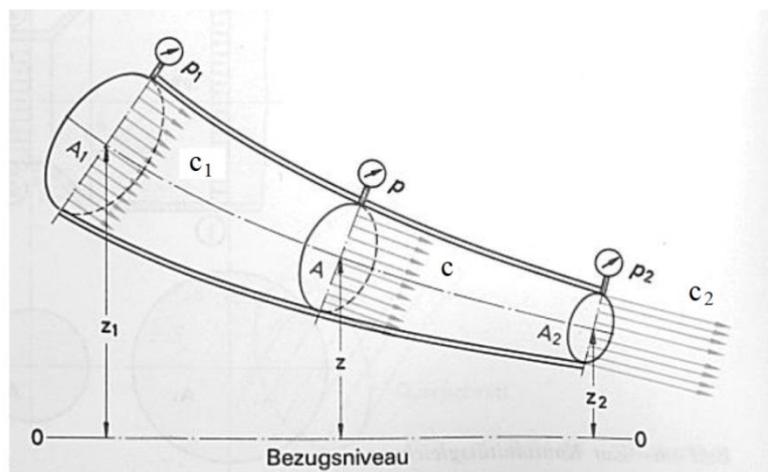


Abb. 1.5 Stromfaden zur Bernoulli-Gleichung

1.1.8 Verschiedene Druckbegriffe in Strömungen und deren Messung

Einen Sonderfall der Bernoulli-Gleichung (1.4) stellt die Strömung in einer Ebene dar. Dann entfällt der Höhenterm $\rho \cdot g \cdot z$, der auch **geodätischer Druck** genannt wird. Auch bei gasförmigen Fluiden wie Luft kann der Höhenterm vernachlässigt werden, wenn die Höhendifferenz zwischen Punkt 1 und 2 gering ist. Dies trifft auf den Laborversuch zu. Die Gleichung lautet dann:

$$p + \frac{\rho}{2} \cdot c^2 = konst. \quad (1.6)$$

Wir nennen den ersten Term wie erwähnt **statischen Druck**: $p = p_{stat}$ (1.7)

Der zweite Term ist der **dynamische Druck**: $p_{dyn} = \frac{\rho}{2} \cdot c^2$ (1.8)

Die Summe beider Drücke ist der **Gesamtdruck**: $p_{ges} = p_{stat} + p_{dyn}$ (1.9)

Der **Gesamtdruck** bleibt entlang des Stromfadens **konstant**, sofern die Strömung reibungsfrei ist. Der statische Druck und die Strömungsgeschwindigkeit sind damit an jedem Punkt über den konstanten Gesamtdruck untrennbar miteinander gekoppelt. Wir betrachten zunächst eine Umströmung eines Körpers. Eine einzige Stromlinie wird immer aus allen anderen Stromlinien herausragen. Sie läuft genau senkrecht auf einen Punkt der Körpervorderseite zu und die Geschwindigkeit wird dort zu Null abgebremst (Abb. 1.6). Den Punkt nennen wir **Staupunkt**, die Stromlinie **Staupunktstromlinie**.

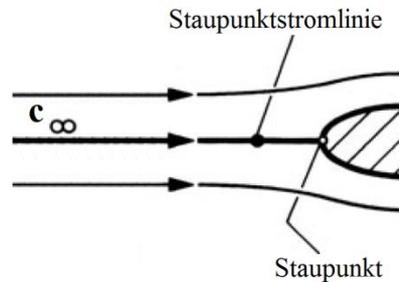


Abb. 1.6 Staupunkt und Staupunktstromlinie

Stellen wir die Bernoulli-Gleichung für die Staupunktstromlinie auf. Der Punkt ∞ liegt auf der Staupunktstromlinie weit vor dem Körper. Der Index SP kennzeichnet den Staupunkt. Die Geschwindigkeit im Staupunkt verschwindet ($c_{SP} = 0$). Der statische Druck im Staupunkt ist dann gleich dem Gesamtdruck.

$$p_{\infty} + \frac{\rho}{2} \cdot c_{\infty}^2 = p_{SP} + \frac{\rho}{2} \cdot c_{SP}^2 = p_{SP} = p_{ges} \quad (1.10)$$

Mittels **Pitot-Rohr** kann der Gesamtdruck einer Strömung ermittelt werden. Das Pitot-Rohr ist ein rechtwinklig gebogenes Metallrohr, das parallel zur Strömung entgegen der Stromrichtung ausgerichtet wird. Im Staupunkt des Pitot-Rohrs ist eine kleine Bohrung eingelassen (Abb. 1.7). Dort wird die Strömung zu Null abgebremst. Es liegt dann der Gesamtdruck vor. Er pflanzt sich im Pitot-Rohr fort und kann, über einen dünnen Verbindungsschlauch an ein Manometer angeschlossen, gemessen werden (Informationen zu Manometern in Kapitel 1.2).

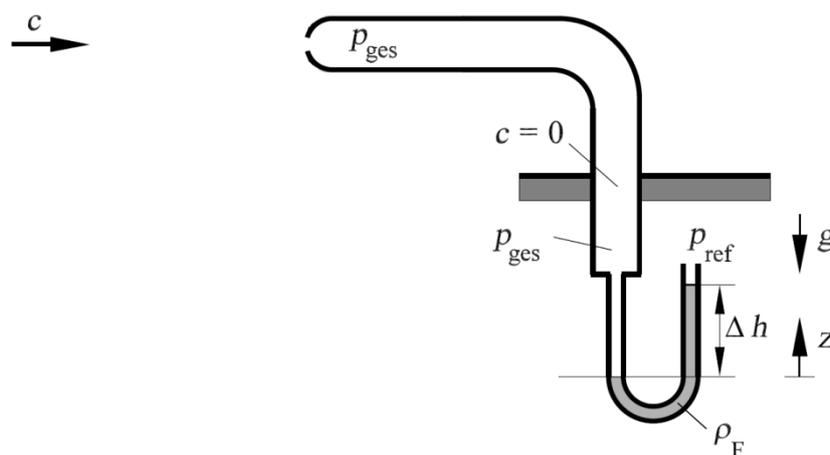


Abb. 1.7 Pitot-Rohr mit angeschlossenem U-Rohrmanometer

Der statische Druck wirkt senkrecht auf Wände. Folglich werden wir den statischen Druck einer Strömung im wandnahen Bereich auch an der Wand messen. Wollen wir den statischen Druck an einer überströmten Körperoberfläche bestimmen, verwenden wir eine **Wandanbohrung** (Abb. 1.8). Zur Vermeidung von Messfehlern muss sie senkrecht zur Wand gebohrt, scharfkantig und gratfrei sein.

Der Bohrl Lochdurchmesser sollte klein sein ($d \approx 0,3 \dots 1 \text{ mm}$). Zur eigentlichen Druckmessung muss wieder ein Manometer angeschlossen werden.

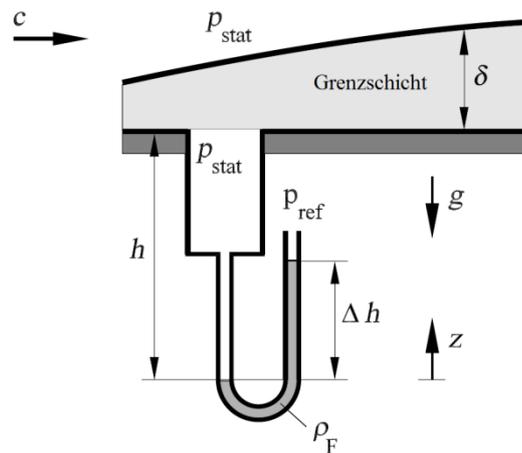


Abb. 1.8 Wandanbohrung mit angeschlossenem U-Rohrmanometer

Genau genommen misst eine Wandanbohrung nicht den statischen Druck in der Strömung, sondern den statischen Druck in der Grenzschicht (siehe Kapitel 1.1.10). Der statische Druck in der Grenzschicht kann aber senkrecht zur Wand als konstant und genauso groß wie der lokale statische Druck in der Außenströmung angenommen werden (Prandtl'sche Grenzschichttheorie).

Interessieren wir uns für den statischen Druck innerhalb einer Strömung, können wir eine **statische Drucksonde** anwenden (Abb. 1.9). Sie hat äußerlich die gleiche Bauform wie ein Pitot-Rohr, im Staupunkt fehlt aber die Bohrung. Über dem Umfang, des in der Strömung liegenden Rohrschenkels, sind diverse kleine Bohrungen eingelassen. Sie funktionieren wie Wandanbohrungen. Der statische Druck in der Strömung pflanzt sich durch die Sonde fort und kann wieder mit einem Manometer gemessen werden.

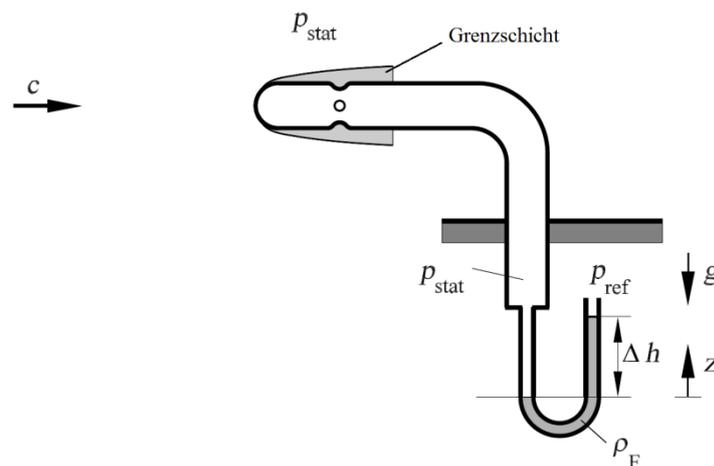


Abb. 1.9 Statische Drucksonde mit angeschlossenem U-Rohrmanometer

Wir haben Druckmessgeräte kennengelernt, mit denen wir sowohl den statischen als auch den Gesamtdruck an einem beliebigen Ort in einer Strömung messen können. Über die Gleichung (1.6) lässt sich dann der dynamische Druck, der wiederum die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit ermöglicht, bestimmen. Das **Prandtl-Rohr** vereinigt beide Druckmessgeräte und ermöglicht so die direkte Messung des dynamischen Drucks (Abb. 1.10). Im inneren einer statischen Drucksonde ist ein Pitot-Rohr eingebaut. Dadurch hat das Prandtl-Rohr zwei Anschlüsse, einen für den Gesamtdruck und einen für den statischen Druck. Wird das Prandtl-Rohr an ein Manometer angeschlossen, das Differenzdrücke messen kann, ist der dynamische Druck direkt ablesbar. Der Vorteil des Prandtl-

Rohrs liegt im Wesentlichen darin, dass beide Messinformationen zeit- und ortsgleich gewonnen werden können. Außerdem liefert das Prandtl-Rohr bei entsprechend optimierter Sondenform tendenziell genauere Messergebnisse. Nachteilig wirkt sich seine größere Bauform aus.

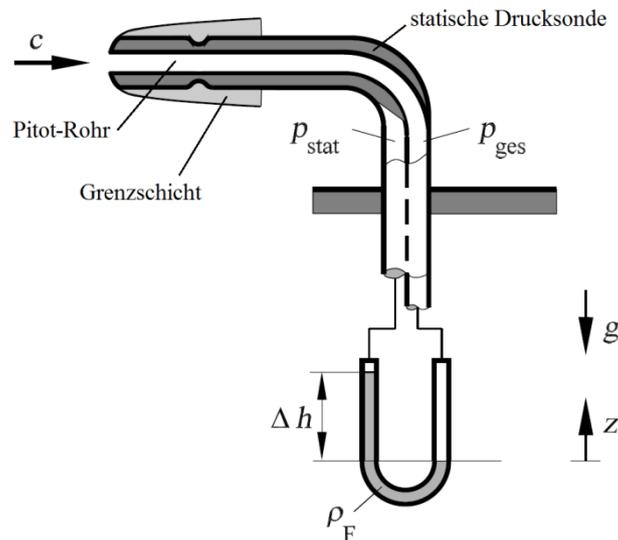


Abb. 1.10 Prandtl-Rohr mit angeschlossenem U-Rohrmanometer

1.1.9 Laminare und turbulente Strömung

Bisher haben wir Strömungen behandelt, deren Stromlinien „geordnet nebeneinander her“ verlaufen. Die Fluidelemente bewegen sich durch den Raum, als würden sie entlang fester Bahnen geführt. Eine solche Strömung nennen wir **laminar**. Messen wir an einem beliebigen Ort in einer laminaren stationären Strömung eine physikalische Größe (z. B. den statischen Druck oder die Geschwindigkeit) werden wir einen zeitunabhängigen konstanten Wert feststellen. Messen wir die gleiche Größe in einer **turbulenten** Strömung, werden wir ein Zeitsignal erhalten (Abb. 1.11).

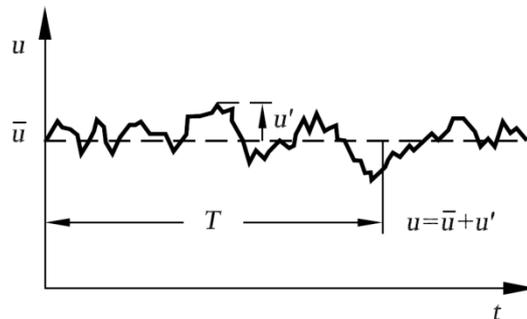


Abb. 1.11 Turbulentes Zeitsignal der Geschwindigkeit

Die gemessene Geschwindigkeit u schwankt innerhalb eines Wertebereichs. Wir können erkennen, dass die Geschwindigkeit einen hochgradig instationären Charakter hat. Das Zeitsignal lässt sich aber in einen zeitlichen Mittelwert \bar{u} und eine Schwankungsgröße u' zerlegen:

$$u = \bar{u} + u' \quad (1.11)$$

Der zeitliche Mittelwert kann dann häufig wieder als stationäre Strömung behandelt werden. Die Schwankungen in einer turbulenten Strömung werden durch zufällige Wirbelbewegungen verursacht, die die Strömung überlagern. Die **Wirbelbewegungen** sind dafür verantwortlich, dass sich turbulente Strömungen **stark vermischen**. Dies beeinflusst maßgeblich die Geschwindigkeitsverteilung von Strömungen in Rohren und Kanälen. Wir wollen noch anmerken, dass der allergrößte Teil technischer

Strömungen nicht laminar, sondern **turbulent** ist. Auch die Strömung im Laborversuch ist turbulent. Deutlich wird das durch schwankende Anzeigen an Messgeräten werden.

1.1.10 Grenzschicht

Reale Strömungen sind immer mehr oder weniger reibungsbehaftet. Nach der Prandtl'schen Grenzschichttheorie lässt sich eine Strömung in zwei Bereiche unterteilen, in eine **reibungsfreie ungestörte Außenströmung** und in eine dünne reibungsbehaftete Schicht auf überströmten Wänden, die **Grenzschicht** genannt wird (Abb. 1.12). Auf Wänden ist die Strömungsgeschwindigkeit immer gleich Null. Das Fluid haftet auf der Wand. Dies ist die sogenannte **Haftbedingung**. Die Außenströmung hat die Geschwindigkeit u_∞ . Da physikalische Größen kontinuierlich verteilt sind, also keine Geschwindigkeitssprünge auftreten können, liegt in der Grenzschicht in vertikaler Richtung ein Übergang von $u = 0$ nach $u = u_\infty$ vor. Wir sprechen von einem **Geschwindigkeitsgradienten**.

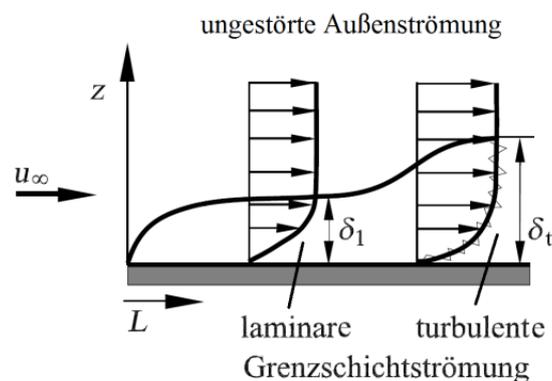


Abb. 1.12 Geschwindigkeitsprofil einer Grenzschichtströmung

Die Dicke δ der Grenzschicht steigt entlang einer überströmten Wand immer weiter an. Dies wird durch die Reibung verursacht. Betrachten wir die Strömung als eine Bewegung nebeneinander liegender Fluidschichten. Die Fluidschichten strömen alle mit der Geschwindigkeit u_∞ und treffen dann auf eine Wand. Aufgrund der Haftbedingung klebt die unterste Schicht auf der Wand. Sie reibt sich an der darüber liegenden Fluidschicht. Diese Fluidschicht wird abgebremst und reibt wiederum an der darüber verlaufenden Fluidschicht, die auch abgebremst wird. Dies setzt sich entlang der Wand immer weiter fort. Je länger die Wand ist, desto mehr Fluidschichten werden abgebremst. Die Grenzschicht wächst. Infolge von Stabilitätsproblemen wird irgendwann die Strömung in der Grenzschicht vom laminaren auf den turbulenten Zustand umschlagen. Da sich turbulente Strömungen stark vermischen, kann Impuls quer zur Hauptströmungsrichtung transportiert werden. Deswegen haben turbulente Grenzschichten im Vergleich zu laminaren in Wandnähe noch höhere Geschwindigkeiten.

1.1.11 Rohrströmung

Die Messung von Volumen- oder Massenströmen findet üblicherweise in Rohrleitungen statt. Deswegen spielt die **Rohrströmung** eine wichtige Rolle. Die Strömungsgeschwindigkeit in einer Rohrströmung ist nicht über dem Rohrquerschnitt gleich groß, wohl aber der statische Druck. Es bildet sich ein **Geschwindigkeitsprofil** aus. Die Entstehung des Geschwindigkeitsprofils wird durch die Fluidreibung verursacht. Betrachten wir den Eintrittsquerschnitt eines Rohres, in das ein Fluid eingesaugt wird (Abb. 1.13). Über dem kompletten Rohrquerschnitt wird zunächst die gleiche Geschwindigkeit u_m vorliegen. Direkt am Rohreinlauf beginnt sich eine Grenzschicht auszubilden. Da das Rohr rotationssymmetrisch ist, bildet sich die Grenzschicht am kompletten Rohrumfang. Die Grenzschicht wächst entlang der Rohrwand bzw. in Richtung der Rohrachse immer weiter an, bis sie irgendwann auf der Rohrachse zusammentrifft. Ab diesem Punkt nennen wir die **Rohrströmung voll ausgebildet**. Auf der Rohrachse ist die Geschwindigkeit am größten. Das Geschwindigkeitsprofil

ändert sich dann entlang der Rohrachse nicht mehr, sofern die Strömung nicht gestört wird. Störungen sind beispielsweise Querschnittsänderungen, Rohrbiegungen oder -Verzweigungen, Einbauten im Rohr.

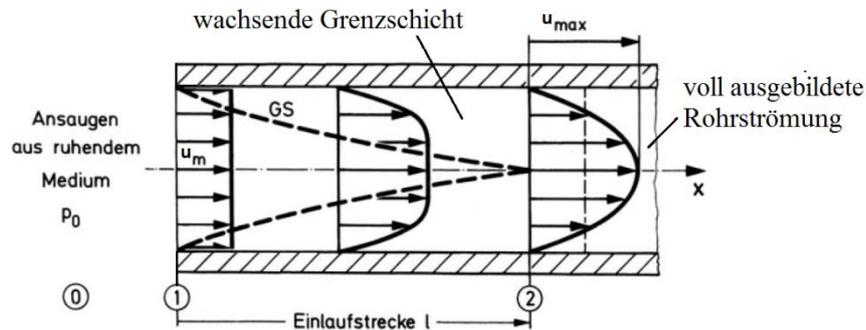


Abb. 1.13 Entstehung einer voll ausgebildeten Rohrströmung

Wir unterscheiden zwischen einer laminaren und einer turbulenten Rohrströmung. Bei der laminaren Rohrströmung ist das Geschwindigkeitsprofil eine **Parabel**. Bei der turbulenten Rohrströmung tritt im zeitlichen Mittel ein „rechteckigeres Profil“ auf. Dies ist eine Folge des Impulsaustauschs turbulenter Strömungen in Querrichtung. Die Maximalgeschwindigkeit auf der Rohrachse ist kleiner. Dafür ist der Geschwindigkeitsgradient in Wandnähe deutlich stärker (Abb. 1.14).

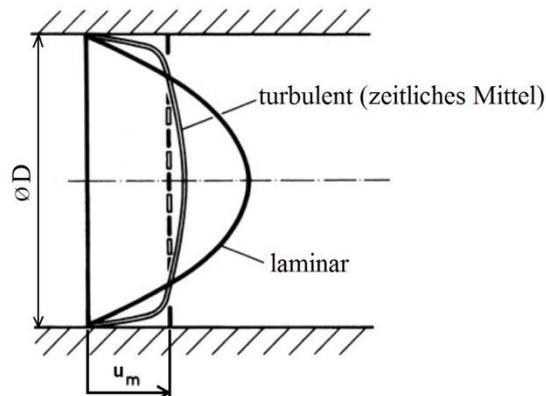


Abb. 1.14 Laminare und turbulente Geschwindigkeitsprofil einer voll ausgebildeten Rohrströmung

Das Rohr hat eine klar ersichtliche **Analogie zu einer Stromröhre**. Deswegen liegt es nahe, die Stromfadentheorie auf Rohrströmungen anzuwenden. Wir können die Bernoulli-Gleichung nutzen. Beim dynamischen Druck setzen wir dann **die mittlere Strömungsgeschwindigkeit** u_m des betrachteten Rohrquerschnitts ein. Sie ergibt sich aus dem Mittelwertsatz der Integralrechnung (mit dem Rohrdurchmesser D):

$$u_m = \frac{1}{A} \int u \cdot dA = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{V}}{\frac{\pi}{4} D^2} \quad (1.12)$$

Aufgrund der Fluidreibung treten allerdings Druckverluste auf. Der **statische Druck sinkt** entlang des Rohres. Dies muss in der Bernoulli-Gleichung durch einen zusätzlich beizufügenden **Druckverlustterm** Δp_{verl} berücksichtigt werden (zur Durchführung des Laborversuches allerdings nicht nötig). Mit Hilfe der Reynolds-Zahl Re , eine der wichtigsten strömungsmechanischen Kenngrößen, können wir bei gegebenem Volumenstrom feststellen, ob die Rohrströmung laminar oder turbulent ist. Die Definition der Re -Zahl lautet:

$$Re = \frac{u_m \cdot D}{\nu} \quad (1.13)$$

Der Buchstabe ν (altgriechisch: ny) steht für die **kinematische Viskosität**. Sie quantifiziert die Zähigkeit eines Fluids. Ihre Einheit ist m^2/s . Technische Rohrströmungen mit $Re > 2300$ können als turbulent angesehen werden.

1.2 Druckmessgeräte

Eigentlich wollen wir im Laborversuch Volumenströme, also Durchflussmengen pro Zeiteinheit, in einem Rohr messen. Folglich wird die Strömungsgeschwindigkeit eine wichtige Rolle spielen. Im vorherigen Kapitel haben wir gesehen, dass statischer Druck und dynamischer Druck, in den die Strömungsgeschwindigkeit eingeht, über den Gesamtdruck miteinander zusammenhängen. Dies nutzen wir aus, indem wir aus verschiedenen Druckmessungen den Volumenstrom berechnen werden. In diesem Kapitel werden verschiedenen Druckmessgeräte kurz vorgestellt, die wir teilweise auch im Laborversuch verwenden werden.

1.2.1 U-Rohrmanometer

Häufig werden für Druckmessungen relativ kleiner Differenzdrücke Flüssigkeitsmanometer verwendet. Das U-Rohrmanometer ist das am einfachsten gebaute Flüssigkeitsmanometer. Die Bauweise anderer Flüssigkeitsmanometer basiert i. d. R. auf Abwandlungen des U-Rohrmanometers. Das klassische U-Rohrmanometer besteht aus einem u-förmig gebogenen Rohr (Abb. 1.15). Meistens ist es aus Glas gefertigt. In dem Manometer befindet sich eine **Sperrflüssigkeit** mit der Dichte ρ_F . Liegen an den beiden Schenkeln zwei unterschiedliche Drücke p_1 und p_2 an, wird die Sperrflüssigkeit aus seiner Ruhelage h_0 ausgelenkt.

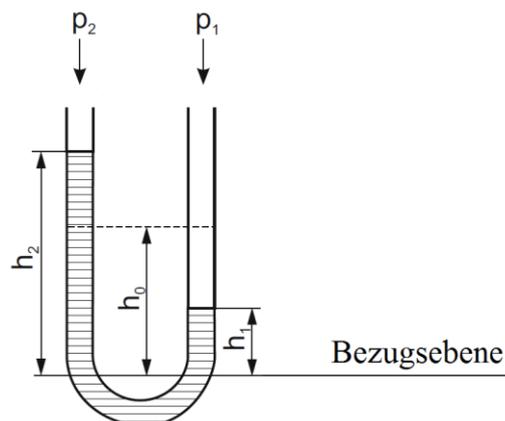


Abb. 1.15 U-Rohrmanometer

Wir legen gedanklich eine Bezugsebene durch die Sperrflüssigkeit. In dieser Ebene muss der statische Druck in beiden Schenkeln gleich groß sein. Anhand der Gleichung (1.1) für den statischen Druck in Flüssigkeiten können wir folgende Beziehung des Druckgleichgewichts in der Bezugsebene aufstellen:

$$p_2 + \rho_F \cdot g \cdot h_2 = p_1 + \rho_F \cdot g \cdot h_1 \quad (1.14)$$

Wir formen diese Gleichung um und erhalten:

$$p_2 - p_1 = \rho_F \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = \rho_F \cdot g \cdot \Delta h \quad (1.15)$$

Wir können den Differenzdruck direkt anhand der Höhendifferenz der Sperrflüssigkeit bestimmen. Als Sperrflüssigkeit werden üblicherweise Wasser, Öl oder bei hohen Druckdifferenzen auch Quecksilber eingesetzt.

1.2.2 Schrägrohrmanometer

Das Schrägrohrmanometer ist eine spezielle Abwandlung eines U-Rohrmanometers. Ein Schenkel kann um den Winkel α schräg gestellt werden (Abb. 1.16). Das verbessert das Auflösungsvermögen. Der andere Schenkel ist zu einem sehr großen Flüssigkeitsgefäß ausgebildet. Dadurch ist die Absenkung des Flüssigkeitsspiegels im Gefäß bei anliegender Druckdifferenz zwischen p_1 und p_2 vernachlässigbar klein.

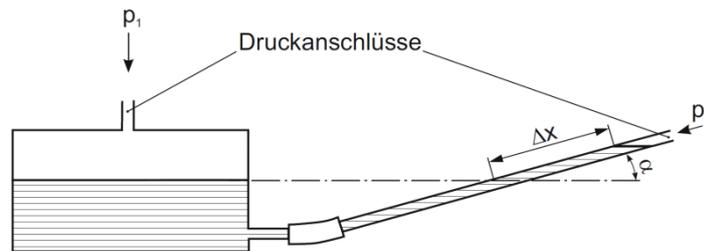


Abb. 1.16 Schrägrohrmanometer

Die Druckdifferenz berechnet sich gemäß folgender Gleichung:

$$p_1 - p_2 = \rho_F \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \Delta x \quad (1.16)$$

1.2.3 Betz-Manometer

Auch das in Abb. 1.17 gezeigte Betz-Manometer ist im Prinzip ein Präzisions-U-Rohrmanometer mit ungleichen Schenkeldurchmessern. An einem Schwimmer im Steigrohr ist ein Glasmaßstab mit eingetragener Skala befestigt. Die Höhenänderung, die sich bei Anlegen einer Druckdifferenz ergibt, kann an der Mattscheibe direkt in *mmWS* oder *mbar* abgelesen werden. Das Betz-Manometer ist ein sehr fein auflösendes Messgerät, aber relativ träge. Die Trägheit wird durch die großen Luftvolumina, die zum Verschieben der Sperrflüssigkeit durch dünne Schläuche in das Gerät strömen müssen, verursacht. Daher treten längere Einstellzeiten auf.

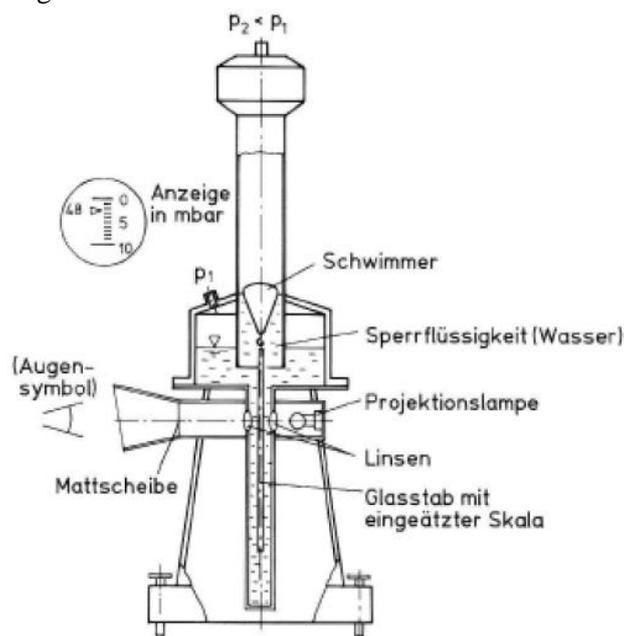


Abb. 1.17 Betz-Manometer

1.2.4 Quecksilber-Barometer

Wir nutzen ein Quecksilberbarometer zur Bestimmung des atmosphärischen Luftdrucks im Laborraum. Bei dem Barometer handelt es sich um ein Gefäßbarometer der Fa. Lambrecht. Die Funktionsweise beruht auf dem Toricelli-Barometer. Die Abb. 1.18 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Als Sperrflüssigkeit wird, wie es der Name schon verrät, Quecksilber eingesetzt. Das Barometer besteht aus einem mit Quecksilber gefüllten Gefäß, auf dessen Flüssigkeitsoberfläche der atmosphärische Luftdruck lastet. In das Quecksilber eingetaucht ist eine dünne lange Glasröhre, die am oberen Ende luftdicht verschlossen ist. Die Glasröhre ist evakuiert.

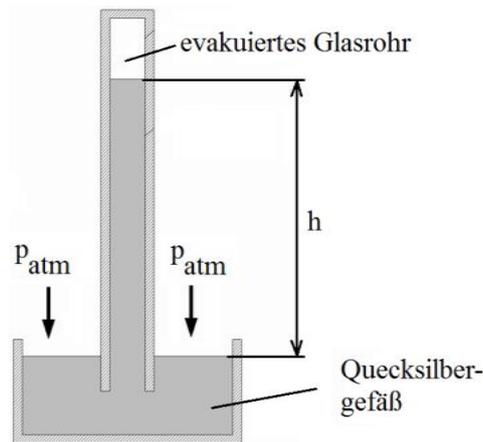


Abb. 1.18 Quecksilberbarometer

Stellen wir die Beziehung für das Druckgleichgewichts auf der Flüssigkeitsoberfläche auf, erhalten wir für den atmosphärischen Luftdruck:

$$p_{atm} = \rho_{Hg} \cdot g \cdot h + p_{Dampf\ Hg} \approx \rho_{Hg} \cdot g \cdot h \quad (1.17)$$

In Wirklichkeit liegt oberhalb der Quecksilbersäule im Glasrohr kein Vakuum vor, da ein Teil des Quecksilbers in die Dampfphase übergeht und im thermodynamischen Gleichgewicht mit der flüssigen Phase des Quecksilbers steht. Der Sättigungsdampfdruck $p_{Dampf\ Hg}$, den die Gasphase erzeugt, müsste somit auf der rechten Seite der Gleichung berücksichtigt werden. Da der Sättigungsdampfdruck des Quecksilbers bei einer Temperatur von $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gerade einmal $p_{Dampf\ Hg} = 0,163\text{ Pa}$ beträgt, kann er aber ohne Bedenken vernachlässigt werden.

Das Quecksilber-Barometer ist mit einer Skala ausgestattet, an der der Höhenunterschied zwischen der Quecksilberoberfläche im Gefäß und der Quecksilbersäule in der Röhre direkt in der Druckeinheit *mbar* abgelesen werden kann. Da sich beide Flüssigkeitsspiegel abhängig von der Ortshöhe über dem Meeresspiegel und den herrschenden Wetterbedingungen ständig ändern, ist die Ablesekala höhenverstellbar und kann somit für jede Messung neu einjustiert werden. Die Justierung und das Ablesen der Skala werden während des Laborversuchs erläutert.

Der gemessene Barometerstand ist ein Rohwert, der noch korrigiert werden muss. Denn die Höhe der Quecksilbersäule wird noch durch weitere Einflussfaktoren mitbestimmt:

- Sowohl die Länge der Skala als auch die Quecksilberdichte sind temperaturabhängig
- Die Erdbeschleunigung hängt von der geographischen Breite sowie der Höhe über dem Meeresspiegel ab (für Siegen: $\varphi = 50^{\circ}51' N$, $H_{Laborraum} \approx 300\text{ m. ü. N.N.}$)
- Da Glas nicht von Quecksilber benetzt wird, bildet sich in der Glasröhre ein konvexer Meniskus (Kuppe) aus, wodurch der Quecksilberstand erniedrigt wird. Die Korrektur ist abhängig vom Rohrdurchmesser und der Kuppenhöhe.

Der tatsächliche atmosphärische Luftdruck p_{atm} berechnet sich aus dem rohen Barometerstand b_t und folgenden zu addierenden Korrekturen (Korrekturen aus vorliegenden Tabellen zu entnehmen):

$$p_{atm} = b_t + K_t + K_{g\varphi} + K_{gH} + K_K \quad (1.18)$$

b_t = der abgelesene Barometerstand (Oberseite der Kuppe)

K_t = Temperatur-Korrektion

$K_{g\varphi}$ = Schwere-Korrektion der geographischen Breite

K_{gH} = Schwere-Korrektion der Ortshöhe

K_K = Korrektion der Kapillardepression (Kuppe)

1.2.5 Elektromechanische Druckmessgeräte

Elektromechanische Druckmessgeräte, auch Druckaufnehmer genannt, wandeln einen Druck bzw. eine Druckdifferenz in eine proportionale elektrische Größe. Im Normalfall ist dies eine Spannung. Es gibt verschiedene Bauarten, um Differenzdrücke oder Absolutdrücke messen zu können. Allen ist aber gleich, dass die mechanische **Verformung einer Membran** bzw. das **elektrische Signal eines drucksensitiven Membranelements** als Maß für die gesuchte Druckinformation verwendet wird. Bezüglich des drucksensitiven Membranelements unterscheidet man zwischen vier weit verbreiteten Druckaufnehmertypen: Widerstandsdruckmessgeräte, piezoelektrische Druckaufnehmer, induktive sowie kapazitive Druckaufnehmer.

Bei **Widerstandsdruckmessgeräten** führt die Verformung von Membranelementen zur Änderung des ohmschen Widerstandes in sehr feinen Metalldrähten (z. B. Dehnungsmessstreifen DMS). Die Abb.1.19 zeigt einen solchen Druckaufnehmer. Der Druck wirkt auf die Membran, die die Verformung eines Biegebalkens mit appliziertem DMS verursacht. Das Widerstandsmessverfahren wird häufig bei sehr großen Drücken bzw. Druckdifferenzen eingesetzt.

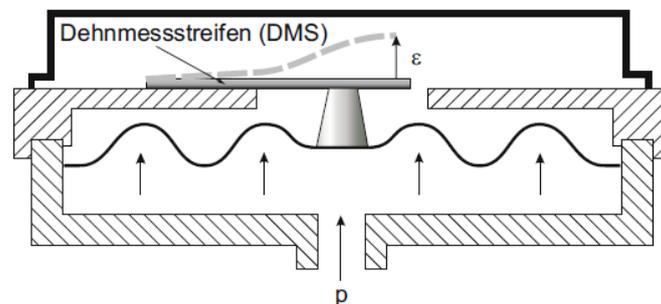


Abb. 1.19 Aufbau eines Widerstandsdruckmessgeräts mit Dehnungsmessstreifen

Bei **piezoelektrischen Druckaufnehmern** wird der Druck auf die Membran mittels eines Transfermediums (z. B. Silikonöl) auf einen Piezokristall übertragen.

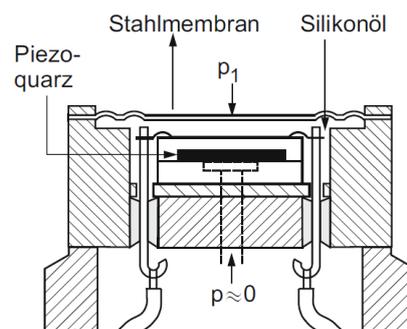


Abb. 1.20 Aufbau eines piezoresistiven Druckaufnehmers zur Absolutdruckmessung

Durch die Druckbelastung ändert sich zum einen die Ladungsverteilung auf der Kristalloberfläche. Wird diese Änderung gemessen, sprechen wir von **piezokapazitiven** Druckaufnehmern. Zum anderen verändert die Druckbelastung den Widerstand des Kristalls. Wird dies zu Messung genutzt, sprechen wir von **piezoresistiven** Druckaufnehmern (Abb. 1.20). Piezoelektrische Druckaufnehmer finden weniger bei der Messung statischer Drücke Verwendung, sondern viel mehr bei rasch veränderlichen Druckschwankungen.

Bei **induktiven Druckaufnehmern** wird die Verschiebung der Membran infolge der Druckbeaufschlagung von elektromagnetischen Spulen registriert (Beeinflussung des Magnetfeldes). Sie sind sehr robust und können auch in rauen Umgebungsbedingungen eingesetzt werden.

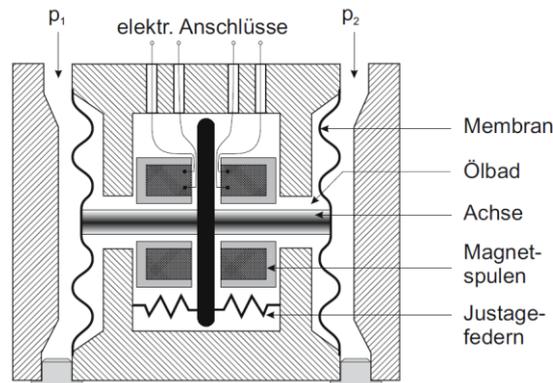


Abb. 1.21 Aufbau eines induktiven Druckaufnehmers

Die Membran **kapazitiver Druckaufnehmer** ist gleichzeitig eine Kondensatorplatte (Abb. 1.22). Wird die Membran infolge einer Druckbeaufschlagung verformt, ändern sich der Plattenabstand und damit die Kapazität des Kondensators. Wir werden im Rahmen dieses Laborversuchs einen kapazitiven Druckaufnehmer verwenden.

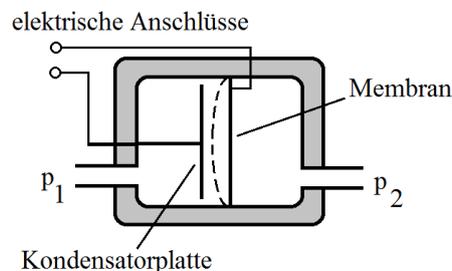


Abb. 1.22 Aufbau eines kapazitiven Druckaufnehmers

Elektromechanische Druckmessgeräte werden für verschiedene Druckmessbereiche in verschiedensten Ausführungen gebaut. Die Wahl des geeignetsten Gerätes hängt von der jeweiligen Messaufgabe ab. Es gibt Modelle, die anliegende Drücke normal oder sehr fein auflösen können. Die weit verbreitete Meinung, dass elektrische Druckmessgeräte genauere Werte liefern können als Flüssigkeitsmanometer, stimmt nur bedingt. Dies hängt immer von der Leistungsfähigkeit der verwendeten Geräte ab. Der Vorteil elektromechanischer Geräte liegt in der schnellen und digitalisierbaren Datenerfassung mit Rechnern. Das Ablesen von Flüssigkeitsständen entfällt.

2 Durchflussmessverfahren

Unter einer **Durchflussmessung** verstehen wir die messtechnische Bestimmung des momentan durch einen Querschnitt einer Rohrleitung fließenden Massen- oder Volumenstroms. Für die Durchflussmessung in Rohrleitungen strömender Flüssigkeiten oder Gase sind verschiedene Messverfahren entwickelt worden. Bei Kenntnis der Dichte können Volumen- und Massenstrom ineinander umgerechnet werden:

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (2.1)$$

Wobei \dot{m} für den Massenstrom in kg/s, ρ für die Dichte in kg/m³ und \dot{V} für den Volumenstrom in m³/s steht.

2.1 Wichtige Volumenstrommessverfahren

- Messung des verdrängten Fluidvolumens, z. B mit einem Ovalradzähler, Flügelradzähler, Woltmannzähler, Ringkolbenzähler. (Verwendung in Tankstellenzapfsäulen, Wasseruhren etc.)
- Ausnutzung des Staudrucks mit einer Stauscheibe oder einem Schwebekörper
- Netzmessung
- Messung der Druckdifferenz an einem Drosselgerät, auch Wirkdruckverfahren genannt
- Ultraschall-Durchflussmesser (Laufzeitmessung einer Ultraschallwelle im strömenden Fluid)
- Magnetisch-induktive Durchflussmesser (nur bei leitfähigen Fluiden möglich)
- Frequenzmessung abgehender Wirbel hinter einem Störkörper (Wirbelfrequenzdurchflussmesser)

2.2 Wichtige Massenstrommessverfahren

- Messung der Abkühlung eines beheizten Sensorelements (Hitzdraht oder Heißfilm)
- Drehimpulsübertragung von einem rotierenden auf ein feststehendes Flügelrad
- Messung der Corioliskräfte in einer vom Massenstrom geeignet durchströmten Messapparatur

3 Volumenstrommessverfahren

Im Rahmen des Laborversuchs „Messung von Volumen- und Massenstrom“ werden zwei Volumenstrommessverfahren behandelt, die **Netzmessung** und das **Wirkdruckverfahren**.

3.1 Netzmessung allgemein

Der Volumenstrom \dot{V} durch einen beliebigen durchströmten Querschnitt A (Kanal, Rohr etc.) berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\dot{V} = \int (\underline{u} \cdot \underline{n}) dA \quad (3.1)$$

Das Skalarprodukt $\underline{u} \cdot \underline{n}$ beschreibt nichts anderes, als die Geschwindigkeitskomponente von \underline{u} , die senkrecht auf der Querschnittsfläche A steht. Wenn wir die Geschwindigkeitsverteilung, oder besser gesagt das Geschwindigkeitsprofil, in einem durchströmten Querschnitt ermittelt haben, können wir den Volumenstrom berechnen. Wir verdeutlichen uns die Vorgehensweise einer Netzmessung anhand der Abb. 3.1. Dort soll der Volumenstrom, in einem rechteckigen Kanal bestimmt werden. Wir legen eine **Messebene** in den Kanal, die **senkrecht zur Strömungsrichtung** steht. Dies erleichtert später die Berechnung. In die Messebene legen wir ein Koordinaten-**Gitternetz** (daher auch der Name Netzmessung). Wir kennen die Koordinaten jedes Netzpunktes. Dann messen wir in jedem Netzpunkt

die senkrecht auf der Messebene stehende Geschwindigkeitskomponente von \underline{u} . Die Geschwindigkeit in den Netzpunkten an der Kanalwand setzen wir gleich Null (Haftbedingung). Je feiner das Netz ist, desto exakter können wir die Geschwindigkeitsverteilung in der Messebene ermitteln. Allerdings erhöht sich mit steigender Anzahl an Netzpunkten der Messaufwand. Die Gleichung (3.1) kann dann mit Hilfe der numerischen Integration gelöst werden.

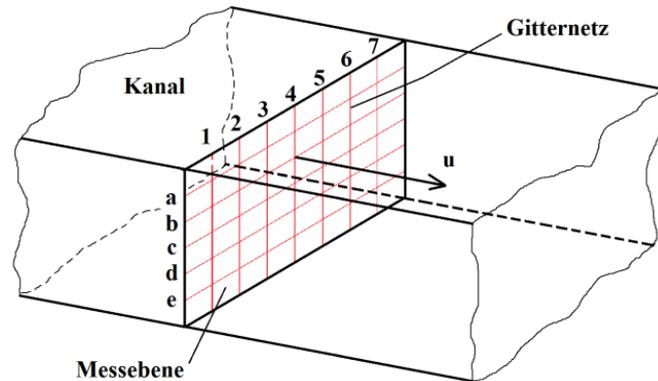


Abb. 3.1 Netzmessung in einem rechteckigen Kanalquerschnitt

3.2 Wirkdruckverfahren allgemein

Bei dem Wirkdruckverfahren wird eine Drossel in die Rohrleitung eingebaut. Die Drossel bewirkt eine Einschnürung der Rohrströmung. Infolge der Querschnittsabnahme nimmt gemäß der Kontinuitätsgleichung (1.3) die Geschwindigkeit zu und gemäß der Bernoulligleichung der statische Druck ab. Diese beiden Beziehungen können in Verbindung zum Volumenstrom gebracht werden.

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, nur bestimmte Formen als Drosselgeräte einzusetzen, die unter geeigneten Bedingungen sehr genaue Messungen des Volumenstroms erlauben. Einige Bauformen sind genormt. Der wesentliche Vorteil des Einsatzes genormter Drosseln besteht darin, dass die Geräte unter Berücksichtigung aller Herstell- und Einbauvorschriften verwendet werden können, ohne vorher kalibriert werden zu müssen. Die Norm EN ISO 5167 beinhaltet mit der Einlaufdüse, Normdüse, Blende und dem Venturirohr die vier gängigsten Drosselgeräte (Abb. 3.2).

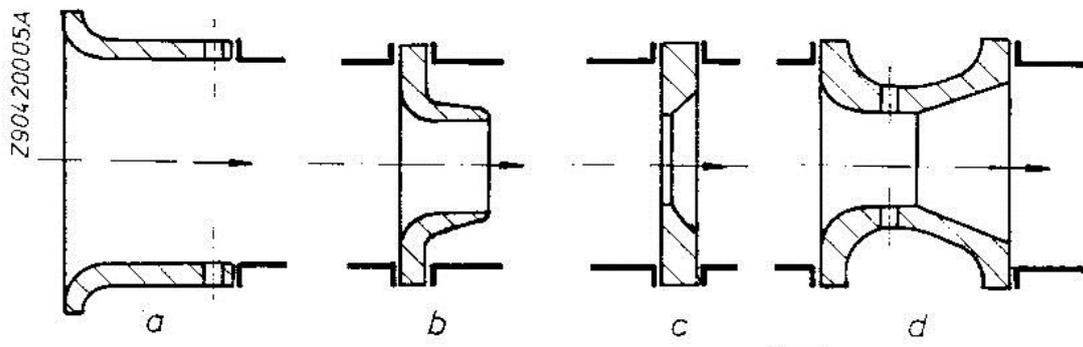


Abb. 3.2 Einlaufdüse (a), Normdüse (b), Normblende (c) und Normventurirohr

Anhand des Venturirohrs wollen wir die Funktionsweise des Wirkdruckverfahrens näher erläutern. Das kreisrunde Venturirohr (Abb. 3.3) verengt den Rohrquerschnitt A_1 kontinuierlich auf den engsten Rohrquerschnitt A_2 . Sowohl vor der Verjüngung als auch am engsten Querschnitt befindet sich jeweils eine Wandanbohrung. Dort werden die statischen Drücke p_1 und p_2 gemessen.

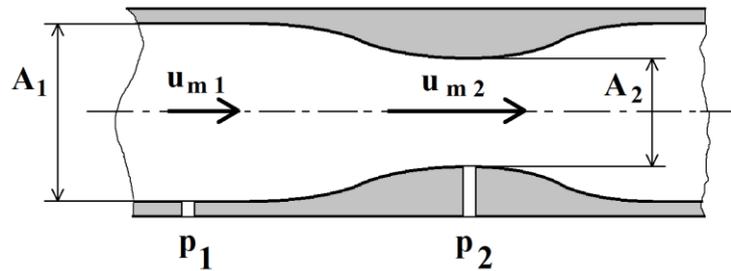


Abb. 3.3 Funktionsweise des Venturirohrs

Die über dem Rohrquerschnitt gemittelten Strömungsgeschwindigkeiten u_{m1} und u_{m2} lassen sich mit dem Volumenstrom und den Querschnittsflächen mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung wie folgt darstellen:

$$u_{m1} = \dot{V}/A_1; \quad u_{m2} = \dot{V}/A_2 \quad (3.2)$$

Wir stellen die Bernoulligleichung zwischen den Querschnitten 1 und 2 auf, dann setzen wir Gleichung (3.2) ein:

$$p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot u_{m1}^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} \cdot u_{m2}^2; \quad p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot (\dot{V}/A_1)^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} \cdot (\dot{V}/A_2)^2 \quad (3.3)$$

Wir stellen nach dem Volumenstrom \dot{V} um und erhalten:

$$\dot{V} = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}\right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2}\right)}} \quad (3.4)$$

Die Druckdifferenz $(p_1 - p_2) = \Delta p$ nennen wir **Wirkdruck**. Wir können aus der Herleitung erkennen, dass wir zur Bestimmung des Volumenstroms mit dem Wirkdruckverfahren zwei Informationen brauchen. Zum einen benötigen wir den Wirkdruck zwischen einem Messpunkt vor der Strömungsverjüngung und dem Messpunkt an der engsten Querschnittsfläche der Strömung. Zum anderen brauchen wir die Querschnittsflächen an beiden Messpunkten. Es sei noch angemerkt, dass die obige Herleitung theoretischer Natur ist und von einer **reibungs- und verlustfreien** Strömung ausgeht. Dies wird in der Realität niemals der Fall sein und muss deswegen noch entsprechend berücksichtigt werden, meist durch von Bauform und Re-Zahl abhängige Korrekturfaktoren.

3.2.1 Messblende

Abb. 3.4 zeigt eine Prinzipskizze der Messblende, der turbulenten Anströmung, des Strömungsverlaufs (Strahlverjüngung und -Aufweitung) und des Druckverlaufs über der Rohrlänge. Die Rohrströmung kommt vor der Blende ungestört axial mit dem statischen Druck p_1 und gegebener Geschwindigkeitsverteilung einer ausgebildeten Rohrströmung an. Die Blende zwingt dann die Strömung, sich zu einem Strahl zu verengen, was auch kurz nach der Blende noch nicht ganz abgeschlossen ist. Die Blende als unstetige Querschnittsverengung bewirkt eine starke **Strahlkontraktion**. Die Strömung löst an der **scharfen Kante** der Blende ab. Stromab verjüngt sich der Strahl weiter (siehe Abb. 3.4). Der Querschnitt der Blende ist folglich größer als der kleinste Strahlquerschnitt. Da die Strömung an der Blende ablöst, bilden sich sogenannte **Totwassergebiete**. Dies sind Bereiche in denen sich große reibungsbehaftete Wirbel bilden. Diese Wirbel verursachen Verluste im statischen Druck, die deutlich größer sind als bei der ungestörten Rohrströmung. Auch vor der Blende bilden sich diese verlustbehafteten Wirbel aus, jedoch sind sie dort nicht so stark

ausgeprägt. Hinter dem engsten Strahlquerschnitt weitet der Strahl langsam auf, bis er sich wieder an die Rohrwand anlegt. Ab dort ist wieder eine ungestörte voll ausgebildete Rohrströmung anzutreffen. Als Richtwert für den Abstand von der Blende bis zum Wiederanlegepunkt kann ein Betrag angenommen werden, der dem 8...10-fachen des Rohrdurchmessers entspricht. Dabei vollzieht sich die **Aufweitung des Strahls** hinter der Blende langsamer als die Kontraktion vor der Blende. Kontraktion und Aufweitung führen aufgrund der Kontinuitätsgleichung erst zum Anstieg und anschließenden Abfall der Geschwindigkeit, wobei bei Erreichen der ungestörten voll ausgebildeten Strömung wieder die ursprüngliche Geschwindigkeitsverteilung auftritt. Der statische Druck verhält sich entsprechend umgekehrt, wobei der Wert vor der Blende hinter der Aufweitung nicht wieder erreicht wird, weil die Wirbel in den Totwassergebieten wie bereits erwähnt zu erheblichen Druckverlusten führen. Das Maximum der Geschwindigkeit bzw. das Minimum des Drucks wird an der Stelle des engsten Strahlquerschnitts, also kurz nach der Blende, erreicht.

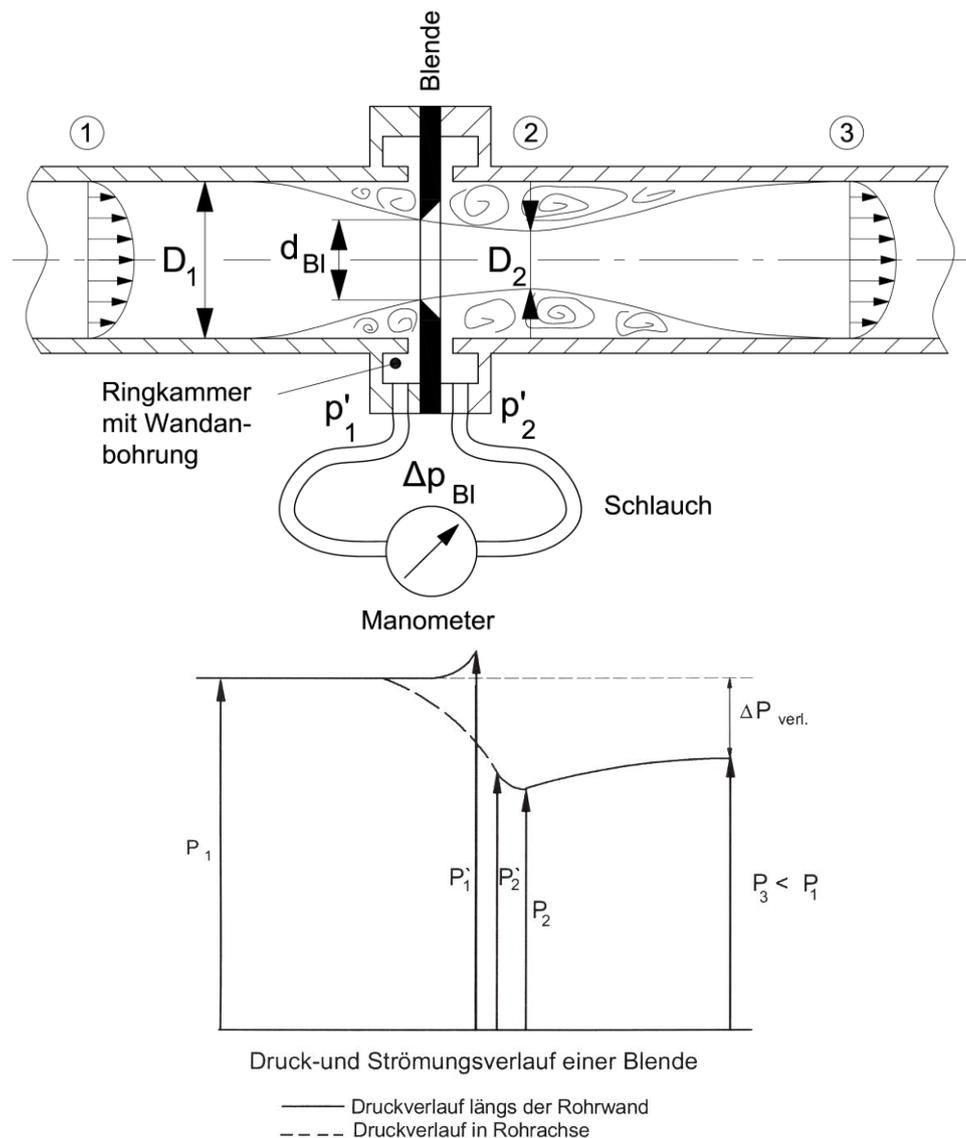


Abb. 3.4 Zeitlich gemittelter Druck- und Strömungsverlauf in einem turbulent durchströmten Rohr im Bereich der Messblende (Strahldarstellung ist nicht maßstäblich)

Zur Ermittlung des Volumenstroms wird der Wirkdruck $\Delta p_{Bl} = p'_1 - p'_2$ unmittelbar vor und hinter der Blende über eine Ringkammer (dient dem Ausgleich kleiner Druckschwankungen) mit Wandbohrungen gemessen. Die eingebaute Blende hat, wie schon erwähnt, eine Druckabnahme aufgrund der Strahlkontraktion und einen Druckverlust aufgrund der Totwassergebiete zur Folge:

$p'_1 > p'_2$. Der Druck p'_1 liegt geringfügig über dem statischen Druckniveau in der Rohrleitung. Bei p'_1 handelt es sich bis auf geringere Verluste vor der Blende um den Staudruck (also den Gesamtdruck), der sich in der Ecke bildet. Wohingegen der statische Druck im Strahl selbst an dieser Stelle der Rohrachse aufgrund der durch die Kontraktion beschleunigten Strömung wesentlich geringer ist, d. h. der statische Druck ist nicht konstant über diesem Rohrquerschnitt. An dem Punkt p'_2 hinter der Blende wird die Strömung nicht aufgestaut, so dass der zugehörige, gemessene statische Druck p'_2 in guter Näherung dem des Strahls an dieser Stelle entspricht. D. h. hier ist der statische Druck nahezu konstant über dem gesamten Rohrquerschnitt, sowohl im Bereich des Strahls als auch des Totwassers. Die Herleitung der Beziehung zwischen Wirkdruck und Volumenstrom erfolgt auch wieder über die Bernoulli- und Kontinuitätsgleichung (Gleichung (3.4)). Hinzu kommen nun noch Korrekturfaktoren, die den Unterschied zwischen den realen Strömungsgegebenheiten und der Theorie berücksichtigen. Die Volumenstromgleichung lautet:

$$\dot{V} = \varepsilon \cdot \frac{C_{Bl}}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{Bl}^2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p_{Bl}} \quad (3.5)$$

Dabei sind:

- $\Delta p_{Bl} = p'_1 - p'_2$ der Wirkdruck
- d_{Bl} der Durchmesser der Messblende
- $\beta = \frac{d_{Bl}}{D}$ das **Durchmesser Verhältnis**, gebildet aus dem Messblendendurchmesser und dem Rohrinne Durchmesser
- C_{Bl} der **Durchflusskoeffizient** der Messblende
- ε die **Expansionszahl**

Die Expansionszahl ist ein dimensionsloser Korrekturfaktor, der bei Gasströmungen Dichteänderungen zwischen beiden Druckmessstellen berücksichtigt. Für sie gilt:

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256 \cdot \beta^4 + 0,93 \cdot \beta^8) \cdot \left[1 - \left(\frac{p'_2}{p'_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] \quad (3.6)$$

Sie muss bei höheren Mach-Zahlen ($Ma > 0,3$) angewandt werden. Davon sind wir beim Laborversuch weit entfernt. Daher können wir $\varepsilon = 1$ setzen.

Der Durchflusskoeffizient C_{Bl} ist ein dimensionsloser Korrekturfaktor, der alle der Theorie nicht zugänglichen Strömungseffekte erfasst. Dies sind:

- Abweichung von der **mittlere Strömungsgeschwindigkeit**: Im Strahlquerschnitt liegt keine gleich große Strömungsgeschwindigkeit vor, sondern ein Geschwindigkeitsprofil. Außerdem ist die Strömung turbulent. Die Strömungsgeschwindigkeit schwankt.
- **Reibungsverluste**: Aufgrund der Totwassergebiete treten Druckverluste auf.
- **Geometrie**: Die erste Druckmessstelle liegt nicht mehr vor der Strahleinschnürung. Die zweite Druckmessstelle liegt nicht im engsten Strahlquerschnitt. Die Strahlform ist unbekannt.

Der Durchflusskoeffizient C_{Bl} hängt von der Reynolds-Zahl der Rohrströmung Re_D und dem Durchmesser Verhältnis β ab. Er wird größtenteils empirisch ermittelt und kann in einer Tabelle der EN ISO 5167-2 nachgeschlagen werden. Da zur Auswahl des Durchflusskoeffizienten die Reynolds-Zahl bekannt sein muss, diese aber mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit u_m im Rohr gebildet wird, handelt es sich beim Wirkdruckverfahren um ein iteratives Messverfahren (siehe Kap. 6.2).

3.2.2 Düse

Auch das Funktionsprinzip der Düse basiert auf der Veränderung des Strömungsquerschnitts, die allerdings deutlich weniger abrupt als bei der Messblende erfolgt. Dementsprechend sind der Wirkdruck und der Druckverlust, aber auch die Messgenauigkeit der Düse geringer. Der Gleichung des Volumenstroms ist identisch mit der der Messblende:

$$\dot{V} = C_{Dü} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p_{Dü}} \quad (3.7)$$

Der Durchflusskoeffizient der Düse $C_{Dü}$ liegt hier dicht bei eins. D ist der Rohrrinnendurchmesser. Die Abb. 3.5 zeigt eine typische Einlaufdüse. Der Wirkdruck $\Delta p_{Dü}$ wird, wie im Bild zu sehen, gegen den atmosphärischen Luftdruck gemessen.

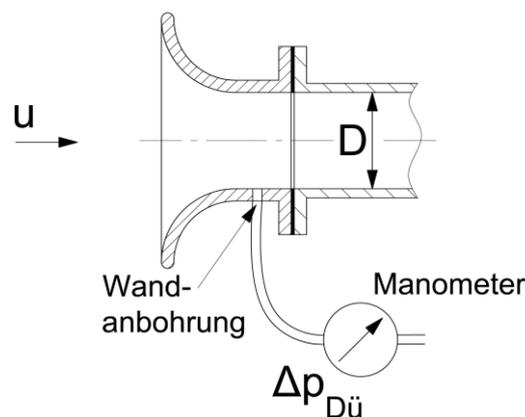


Abb. 3.5 Einlaufdüse

4 Versuchsaufbau

In der dargestellten Versuchsanlage (Abb. 4.1) wird Luft mit einem Radialventilator durch eine Messstrecke mit dem Rohrrinnendurchmesser D gefördert. Die Luft durchströmt dabei nacheinander eine nicht genormte Einlaufdüse, eine Messblende nach EN ISO 5167-2 und einen Querschnitt, in dem das Geschwindigkeitsprofil mittelbar mit einem über dem Rohrdurchmesser verfahrbaren Pitot-Rohr vermessen wird (Netzmessung). Zur Messung der Druckdifferenzen an den Drosselgeräten und am Pitot-Rohr werden sowohl Flüssigkeitsmanometer (Schrägrohr- und Betz-Manometer) als auch ein kapazitiver Druckaufnehmer verwendet. Der Umgebungsluftdruck p_{atm} wird mit einem Quecksilberbarometer ermittelt. Die Umgebungstemperatur T ist an einem Thermometer ablesbar. Aufgrund der im Versuch realisierten geringen Druckdifferenzen bzw. kleinen Ma-Zahlen kann davon ausgegangen werden, dass sich die Luft wie ein inkompressibles Fluid mit konstanter Dichte verhält. Somit entspricht die Luftdichte in der Rohrströmung an jeder Stelle der Luftdichte der Umgebung. Aus demselben Grund kann $\varepsilon = 1$ gesetzt werden. Die Messblende liefert von allen drei eingesetzten Verfahren die genauesten Ergebnisse.

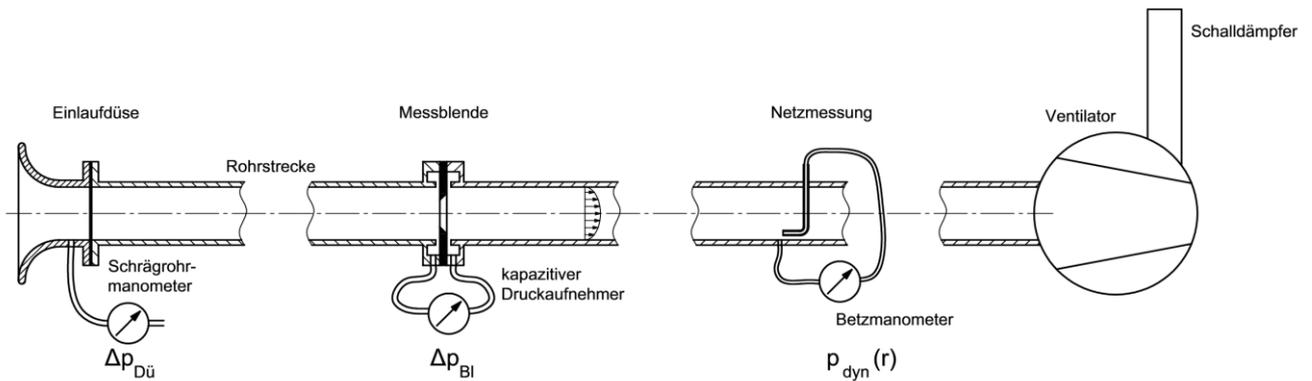


Abb. 4.1 Versuchsanlage

Der **Rohrinnendurchmesser** der gesamten Messstrecke und der Einlaufdüse beträgt $D = 76 \text{ mm}$. Der **Blendendurchmesser** beträgt $d_{Bl} = 49,4 \text{ mm}$.

5 Versuchsdurchführung

Mittels der Ventilator Drehzahl sind vier verschiedene Volumenströme einzustellen. Die eingestellte Ventilator Drehzahl wird mit einem Tachometer überprüft. Für jede gewählte Drehzahl muss der Wirkdruck an der Einlaufdüse und der Messblende notiert werden. Die gemessenen Werte haben verschiedene Einheiten und müssen in Pa umgerechnet werden.

Die allgemeine Vorgehensweise bei einer Netzmessung wird in Kapitel 3.1 erläutert. Da wir eine Rohrströmung vermessen wollen, die bekanntlich **rotationssymmetrisch** ist, brauchen wir kein Gitternetz über den kompletten Rohrquerschnitt legen. Wir vermessen das Geschwindigkeitsprofil auf einem **Radialstrahl** (Abb. 5.1). Dazu verfahren wir mit einem Pitot-Rohr von der Rohrachse in sieben Schritten bis zur unteren Rohrwand.

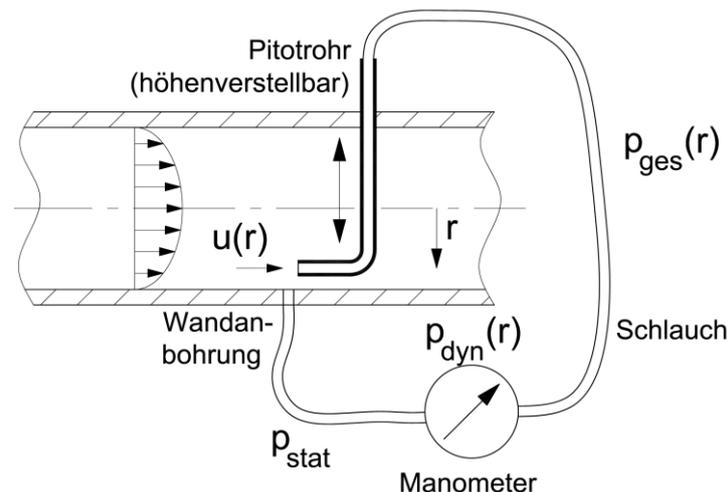


Abb. 5.1 Durchführung der Netzmessung im Rohrquerschnitt

Das Pitot-Rohr misst den Gesamtdruck $p_{ges}(r)$. An einer Wandanbohrung wird der statische Druck p_{stat} abgegriffen, der über den gesamten Rohrquerschnitt konstant ist. Der Druckanschluss der Wandanbohrung und des Pitot-Rohrs sind durch Schläuche mit einem Betz-Manometer verbunden. Dort wird die Druckdifferenz aus Gesamtdruck und statischem Druck gemessen, welche der dynamische Druck $p_{dyn}(r)$ ist. Auch diese Messwerte müssen in die Einheit Pa umgerechnet werden. **Alle Messwerte werden in das beiliegende Messprotokoll auf Seite 30 eingetragen!**

6 Auswertung Messerergebnisse

Aus den notierten Messwerten müssen anschließend für jede Drehzahl des Ventilators und jedes Messverfahren die Volumenströme berechnet werden.

6.1 Dichtebestimmung

Bevor die Messergebnisse ausgewertet werden können, muss die Luftdichte bestimmt werden. Wir messen den atmosphärischen Luftdruck und die Umgebungstemperatur. Dann berechnen wir die Luftdichte (ideale Gasgleichung). Die spezifische Gaskonstante von Luft ist $R_L = 287,2 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

6.2 Berechnung des Volumenstroms an der Messblende

Die Berechnung des Volumenstroms aus den Messergebnissen der Messblende geschieht iterativ in den folgenden Schritten:

- Wir rechnen den gemessenen Wirkdruck Δp_{Bl} in die Einheit Pa um.
- Wir schätzen die Reynolds-Zahl für die Rohrströmung Re_D .
- Wir entnehmen anhand Re_D und β den Durchflusskoeffizienten C_{Bl} aus der Tabelle 10.1
- Wir berechnen einen vorläufigen Wert des Volumenstroms \dot{V}_{Bl} gemäß Gleichung (3.5)
- Aus dem vorläufigen Wert des Volumenstroms und dem Rohrrinnendurchmesser berechnen wir gemäß Gleichung (1.12) die vorläufige mittlere Strömungsgeschwindigkeit u_m im Rohr.
- Wir berechnen mit diesem u_m die Reynolds-Zahl für die Rohrströmung nach Gleichung (1.13).
- Wir vergleichen die berechnete mit der zu Anfangs geschätzten Reynolds-Zahl. Sind beide Werte in etwa gleich groß, sind wir fertig. Wir haben den Volumenstrom direkt im ersten Versuch richtig berechnet.

Weichen die Reynolds-Zahlen voneinander ab, muss die Berechnung des Volumenstroms wiederholt werden. Wir verwenden die berechnete Reynolds-Zahl und wählen damit ein neues C_{Bl} aus. Die obigen Rechenschritte werden wiederholt, bis beide Reynolds-Zahlen in etwa gleich groß sind. Üblicherweise muss diese Iteration nicht mehr als zwei Mal durchlaufen werden.

Die kinematische Viskosität ν von Luft bei Normaldruck in Abhängig von der Temperatur wird aus der folgenden Tabelle entnommen. Zwischenwerte müssen interpoliert werden.

$T \text{ in } ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40
$\nu \text{ in } \text{m}^2/\text{s}$	$13,28 \cdot 10^{-6}$	$14,18 \cdot 10^{-6}$	$15,10 \cdot 10^{-6}$	$16,03 \cdot 10^{-6}$	$16,98 \cdot 10^{-6}$

6.3 Einlaufdüse

Die Einlaufdüse soll kalibriert werden. Das heißt, wir müssen den unbekanntem Durchflusskoeffizienten $C_{Dü}$ berechnen. Aufgrund der Massenerhaltung (Kontinuität) und der konstanten Dichte ist der Volumenstrom an jeder Stelle im Versuchsstand gleich groß. Es gilt $\dot{V}_{Bl} = \dot{V}_{Dü}$. Bei der Berechnung wird folgendermaßen vorgegangen:

- Wir rechnen den gemessenen Wirkdruck $\Delta p_{Dü}$ in die Einheit Pa um.
- Wir stellen die Gleichung (3.7) nach $C_{Dü}$ um.
- Darauf setzen wir $\Delta p_{Dü}$ sowie \dot{V}_{Bl} ein und berechnen dann den Durchflusskoeffizienten.

6.4 Berechnung des Volumenstroms anhand der Netzmessung

Die Berechnung des Volumenstroms erfolgt in folgenden Schritten:

- Aus dem gemessenen dynamischen Druck eines jeden angefahrenen Messpunkts wird gemäß Gleichung (1.8) die Geschwindigkeit berechnet. Das gemessene halbe Geschwindigkeitsprofil im Rohr sieht qualitativ wie in Abb. 6.1 aus.

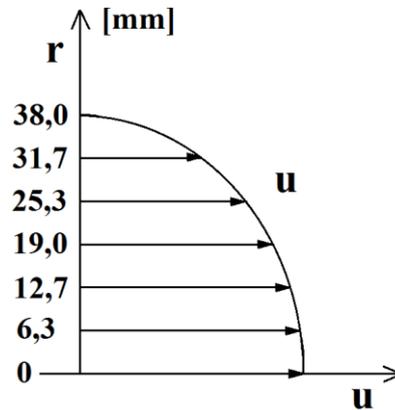


Abb. 6.1 Geschwindigkeitsprofil des Radialstrahls

- Zur numerischen Integration verwenden wir das Simpson-Verfahren. Zunächst wird der Integrand $y = u(r) \cdot r$ berechnet. Die Abb. 6.2 zeigt schematisch den Verlauf des Integranden.

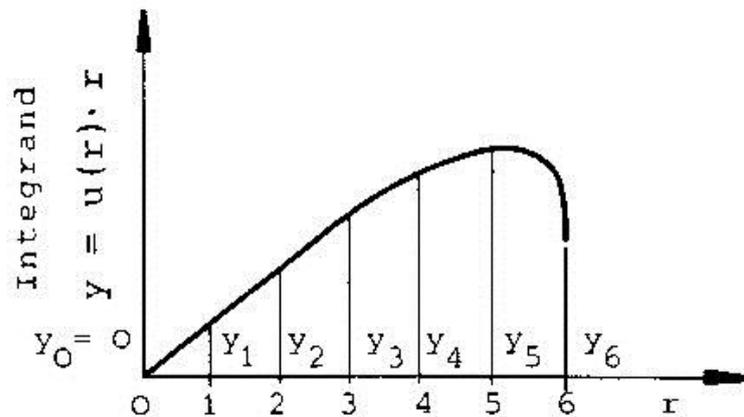


Abb. 6.2 Schematischer Verlauf von $y = u(r) \cdot r$

- Die Beziehung für den Volumenstrom lautet dann:

$$\dot{V}_{\text{Netz}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{D}{2 \cdot 6} \cdot (y_0 + 4 \cdot y_1 + 2 \cdot y_2 + 4 \cdot y_3 + 2 \cdot y_4 + 4 \cdot y_5 + y_6) \quad (6.1)$$

7 Versuchsprotokoll

Es ist ein Versuchsbericht pro Gruppe abzugeben. Der Versuchsbericht ist spätestens zwei Wochen nach Durchführung des Laborversuchs beim Versuchsbetreuer (PB-D0112, nur Mo, Di, Mi) oder im Briefkasten von Prof. Foysi (2.Stock, Gebäude PB-A) in schriftlicher Ausführung abzugeben. Des Weiteren ist der Bericht auch als PDF-Datei dem Versuchsbetreuer zu übersenden (per E-Mail an alexander.bald@uni-siegen.de). Auf dem Deckblatt des Versuchsberichts, es kann die erste Seite dieses Skriptes verwendet werden, müssen die Gruppennummer, die Vor- und Nachnamen sowie die Matrikelnummern der Teilnehmer stehen. Es ist eine Korrektur des abgegebenen Berichtes gestattet.

Der Versuchsbericht muss folgende Punkte enthalten:

1. Versuchsbeschreibung
 - 1.1 Beschreibung der Messeinrichtungen und des Versuchsstandes
 - 1.2 Versuchsdurchführung
2. Messprotokoll (die letzten zwei Seiten des Versuchsskriptes)
3. Auswertung der Messung

3.1 Berechnung der Luftdichte (nach Kapitel 6.1)

Wählen Sie nun eine Ventilator Drehzahl aus und berechnen Sie exemplarisch:

- 3.2 Volumenstrom \dot{V}_{Bl} an der Messblende (nach Kapitel 6.2)
- 3.3 Durchflusskoeffizient $C_{Dü}$ (nach Kapitel 6.3)
- 3.4 Volumenstrom \dot{V}_{Netz} anhand der Netzmessung (nach Kapitel 6.4)

Erstellen Sie folgende 3 Diagramme (hier alle Ventilator Drehzahlen berücksichtigen)

- 3.5 Darstellung der Durchflusskoeffizienten C_{Bl} und $C_{Dü}$ über der Reynoldszahl (in einem Diagramm eingetragen)
- 3.6 Darstellung der arithmetisch gemittelten Geschwindigkeitsprofile $u(r)$ über dem Radius (Kurven für alle Drehzahlen in einem Diagramm eintragen)
- 3.7 Berechnen Sie den relativen Fehler δ zwischen Netzmessung und Messblende.

$$\delta = \frac{\dot{V}_{Netz} - \dot{V}_{Bl}}{\dot{V}_{Bl}}$$

Und fassen Sie die Ergebnisse in einer Tabelle, wie hier dargestellt, zusammen:

Drehzahlen	\dot{V}_{Netz}	\dot{V}_{Bl}	δ

4. Diskussion der Ergebnisse:
 Beurteilen Sie Ihre Ergebnisse kritisch. Decken Sie sich mit den erwarteten Ergebnissen? Haben Sie evtl. Fehler bei der Messung begangen? Woran könnte es liegen, dass Netz- und Blendenmessung voneinander abweichen? Diskutieren Sie die unterschiedlichen Zahlenwerte von C_{Bl} und $C_{Dü}$. Wodurch könnten die Messergebnisse beeinflusst worden sein? Usw

8 Fragen vor der Versuchsdurchführung

Die Versuchsunterlagen sind zur Versuchsvorbereitung sorgfältig durchzuarbeiten. Der folgende Fragenkatalog dient der Selbstkontrolle und sollte im Vorfeld eigenständig beantwortet werden. Vor dem Versuchsbeginn werden Grundlagen der Volumenstrommessung anhand der Fragen nochmals besprochen. Im Anschluss findet **evtl.** eine kurze schriftliche Prüfung statt. Das Bestehen dieser Prüfung erlaubt erst die Teilnahme am Versuch. Ggf. kann auch die Besprechung der Fragen als Prüfung an Stelle der schriftlichen Prüfung anerkannt werden.

HINWEIS: In der Prüfung werden nicht exakt die gleichen Fragen des Fragenkatalogs gestellt werden!

Fragenkatalog:

1. Was ist Druck?
2. Wie ist der hydrostatische Druck in einer Flüssigkeit definiert?
3. Wie funktioniert ein Schrägrohrmanometer?
4. Erklären Sie den Unterschied zwischen einer inkompressiblen Strömung und einem inkompressiblen Fluid?
5. Wie lautet die Bernoulli-Gleichung für eine inkompressible, reibungsfreie, stationäre Strömung? Was besagt die Gleichung? Was muss bei reibungsbehafteten Strömungen hinzugefügt werden?
6. Wie lauten die einzelnen Terme der Bernoulli-Gl. und welcher entfällt bei Luftströmungen?
7. Was sind Pitot-Rohr, Prandtl-Rohr, statische Drucksonde und Wandinbohrung? Welche Größen kann man mit den Geräten messen?
8. Nachdenkaufgabe: In realen also reibungsbehafteten Strömungen, liefern die zuvor erwähnten Sonden bei Messungen in Wandnähe verfälschte Ergebnisse. Woran könnte das liegen?
9. Wie wird in dem Laborversuch die Luftdichte bestimmt (Gleichung angegeben)?
10. Wie hängen Massen- und Volumenstrom zusammen?
11. Wie ist die Reynolds-Zahl für Rohrströmungen definiert?
12. Wie sieht das Geschwindigkeitsprofil einer laminaren und turbulenten Rohrströmung aus und wie entsteht es?
13. Wie funktioniert allgemein eine Netzmessung? Wie wird die Netzmessung in dem Laborversuch durchgeführt?
14. Wie funktioniert das Wirkdruckverfahren mit einer Messblende?
15. Was berücksichtigen der Durchflusskoeffizient und die Expansionszahl?
16. Wie groß ist das Durchmesser Verhältnis der Blende?

9 Literatur

- [1] Nitsche, Wolfgang: „Strömungsmesstechnik“, Springer-Verlag, 1994
- [2] Zierep, Jürgen: „Grundzüge der Strömungslehre“, Springer-Verlag 2010
- [3] Oertel, Herbert: „Strömungsmechanik“, Vieweg und Teubner Verlag, 2011
- [4] EN ISO 5167: „Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt“, 2003

10 Anhang

Durchmesser- verhältnis β	Durchflusskoeffizient C für Re_D gleich											
	5×10^3	1×10^4	2×10^4	3×10^4	5×10^4	7×10^4	1×10^5	3×10^5	1×10^6	1×10^7	1×10^8	∞
0,60	—	0,6282	0,6198	0,6165	0,6134	0,6117	0,6103	0,6073	0,6054	0,6035	0,6027	0,6019
0,61	—	0,6292	0,6205	0,6170	0,6137	0,6120	0,6106	0,6074	0,6054	0,6034	0,6025	0,6017
0,62	—	0,6302	0,6211	0,6175	0,6140	0,6123	0,6108	0,6075	0,6054	0,6033	0,6023	0,6014
0,63	—	0,6312	0,6217	0,6179	0,6143	0,6125	0,6109	0,6075	0,6052	0,6030	0,6021	0,6011
0,64	—	0,6321	0,6222	0,6183	0,6145	0,6126	0,6110	0,6074	0,6051	0,6028	0,6017	0,6007
0,65	—	0,6331	0,6227	0,6186	0,6147	0,6127	0,6110	0,6073	0,6048	0,6024	0,6013	0,6002
0,66	—	0,6340	0,6232	0,6189	0,6148	0,6128	0,6110	0,6071	0,6045	0,6020	0,6008	0,5997
0,67	—	0,6348	0,6236	0,6191	0,6149	0,6127	0,6108	0,6068	0,6041	0,6014	0,6002	0,5990
0,68	—	0,6357	0,6239	0,6193	0,6149	0,6126	0,6106	0,6064	0,6036	0,6008	0,5995	0,5983
0,69	—	0,6364	0,6242	0,6193	0,6147	0,6124	0,6104	0,6059	0,6030	0,6001	0,5987	0,5974
0,70	—	0,6372	0,6244	0,6193	0,6145	0,6121	0,6100	0,6053	0,6023	0,5992	0,5978	0,5964
0,71	—	0,6378	0,6245	0,6192	0,6142	0,6117	0,6094	0,6046	0,6014	0,5982	0,5967	0,5953
0,72	—	0,6383	0,6244	0,6189	0,6138	0,6111	0,6088	0,6038	0,6005	0,5971	0,5955	0,5940
0,73	—	0,6388	0,6243	0,6186	0,6132	0,6104	0,6080	0,6028	0,5993	0,5958	0,5942	0,5926
0,74	—	0,6391	0,6240	0,6181	0,6125	0,6096	0,6071	0,6016	0,5980	0,5943	0,5926	0,5910
0,75	—	0,6394	0,6236	0,6174	0,6116	0,6086	0,6060	0,6003	0,5965	0,5927	0,5909	0,5892

ANMERKUNG Diese Tabelle dient der bequemen Handhabung. Für genaue Interpolationen ist diese Tabelle nicht vorgesehen. Extrapolationen sind nicht zulässig

Tabelle 10.1 Blenden mit Eck-Druckentnahme – Durchflusskoeffizient C für $D \geq 72,12 \text{ mm}$ [2]

	Netzmessung Radialstrahl				Blende		Einlaufdüse	
	γ (mm)	r (mm)	Δp_{dyn} (mmWS)	Δp_{dyn} (Pa)	Δp_{Bl}	Δp_{Bl} (Pa)	$\Delta p_{Dü}$	$\Delta p_{Dü}$ (Pa)
U/min	38,0	0						
	31,7	6,3						
	25,3	12,7						
	19,0	19,0						
	12,7	25,3						
	6,3	31,7						
	0	38,0						
U/min	38,0	0						
	31,7	6,3						
	25,3	12,7						
	19,0	19,0						
	12,7	25,3						
	6,3	31,7						
	0	38,0						
U/min	38,0	0						
	31,7	6,3						
	25,3	12,7						
	19,0	19,0						
	12,7	25,3						
	6,3	31,7						
	0	38,0						
U/min	38,0	0						
	31,7	6,3						
	25,3	12,7						
	19,0	19,0						
	12,7	25,3						
	6,3	31,7						
	0	38,0						

Nr.	y (mm)	r (mm)	u(r) (m/s)	u(r)*r (m ² /s)	k	k*u(r)*r (m ² /s)	\dot{V}_{Netz} (m ³ /s)
U/min	38,0	0			1		
	31,7	6,3			4		
	25,3	12,7			2		
	19,0	19,0			4		
	12,7	25,3			2		
	6,3	31,7			4		
	0	38,0			1		
U/min	38,0	0			1		
	31,7	6,3			4		
	25,3	12,7			2		
	19,0	19,0			4		
	12,7	25,3			2		
	6,3	31,7			4		
	0	38,0			1		
U/min	38,0	0			1		
	31,7	6,3			4		
	25,3	12,7			2		
	19,0	19,0			4		
	12,7	25,3			2		
	6,3	31,7			4		
	0	38,0			1		
U/min	38,0	0			1		
	31,7	6,3			4		
	25,3	12,7			2		
	19,0	19,0			4		
	12,7	25,3			2		
	6,3	31,7			4		
	0	38,0			1		