

## Messtechnik-Labor

Versuch V1

# Druckmessung

Gruppe: .....

	Name	Vorname	Matr.- Nr.
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
6.			
7.			
8.			

Tag des Versuchs: .....

Teilnahme am Versuch: .....

Korrekturhinweise:

Endtestat: .....

L91 050 001 G

## Inhalt

<b>1 Ziel des Laborversuchs .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Einführung .....</b>	<b>3</b>
2.1 Statischer Druck.....	3
2.2 Absolut-, Über-, Differenzdruck.....	4
2.3 Dynamischer und Totaldruck.....	4
2.4 Druckmessung.....	5
<b>2 Versuche .....</b>	<b>6</b>
2.1 <i>Teilversuch A: Messung des barometrischen Luftdrucks</i> .....	6
2.1.1 Grundlagen .....	6
2.1.2 Aufbau eines Quecksilber-Barometers.....	7
2.1.3 Aufgabenstellung .....	7
2.2 <i>Teilversuch B: Kalibrierung eines induktiven Druckaufnehmers mit einer Wassersäule</i> .....	8
2.2.1 Versuchsaufbau.....	8
2.2.2 Aufgabenstellung .....	8
2.3 <i>Teilversuch C: Prandtl'sches Staurohr</i> .....	9
2.3.1 Grundlagen .....	9
2.3.2 Aufgabenstellung .....	10
2.4 <i>Teilversuch D: Messung des Wanddruckverlaufs in einer Venturidüse</i> .....	11
2.4.1 Versuchsaufbau.....	11
2.4.2 Aufgabenstellung .....	12
<b>3 Versuchsbericht.....</b>	<b>13</b>
<b>4. Literatur .....</b>	<b>13</b>
<b>5. Mess- und Auswertblätter .....</b>	<b>14</b>
5.1 <i>Teilversuch A</i> .....	14
5.2 <i>Teilversuch B</i> .....	14
5.3 <i>Teilversuch D</i> .....	15

## 1 Ziel des Laborversuchs

Die Laborteilnehmer sollen sich mit der physikalischen Größe „Druck in Flüssigkeiten und Gasen“ vertraut machen. Dazu werden die Begriffe „Absolut-/Über-/Differenzdruck“ und „Statischer/dynamischer/Totaldruck“ eingeführt. Die Messung des Druckes in Flüssigkeiten und Gasen ist in vielen Bereichen der Technik, der Physik und der Medizin von großer Bedeutung. Im ingenieurwissenschaftlichen Bereich ist man u. a. im Anlagen-, Strömungsmaschinen- und Flugzeugbau und in der Prozesstechnik auf geeignete Verfahren zur Druckmessung angewiesen. Auch die Bestimmung anderer elementarer Größen wie z.B. des Durchflusses oder der Strömungsgeschwindigkeit lässt sich auf eine Druckmessung zurückführen. Die Teilnehmer führen Druckmessungen mit einigen wichtigen Verfahren durch.

## 2 Einführung

### 2.1 Statischer Druck

Betrachten wir einen zylinderartigen Behälter mit Fluid (Gas oder Flüssigkeit), Abb. 1. Das Fluid sei in Ruhe. Greift an einer Fläche  $A$  eine Kraft  $F$  an - z.B. über den Kolben -, so ist der statische Druck im Fluid

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Der statische Druck überträgt sich gleichmäßig in alle Richtungen und ist an jedem Ort in Behälter gleich. Er wirkt senkrecht auf alle Innenflächen (Gesetz von Pascal, Abb. 2). Der Druck wird u. a. in den Einheiten nach Tab. 1 angegeben.

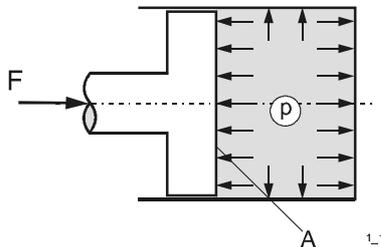


Abb. 1: Zylinderartiger Behälter mit Fluid



Abb. 2: Pascal, Blaise (1623-1662), französischer Philosoph, Mathematiker und Arzt

Tab. 1: Druckeinheiten

1 Pa <sup>1</sup>	= 1 N/m <sup>2</sup> ; 1 kPa = 10 <sup>3</sup> Pa, 1 MPa = 10 <sup>6</sup> Pa
1 bar	= 10 <sup>5</sup> Pa; 1 bar = 1000 mbar
1 psi (pound per square inch)	= 6894,757 Pa

<sup>1</sup> Pa = Pascal; SI-Einheit; Französisch: *Le Système International d'Unités*, **Internationales Einheitensystem von 1960, Paris**

## 2.2 Absolut-, Über-, Differenzdruck

Bezieht man den statischen Druck auf das Vakuum, wo definitionsgemäß der Druck 0 herrscht, so spricht man vom *Absolutdruck*. Auf der Erdoberfläche in Meereshöhe hat der Luftdruck etwa den Absolutwert 100 kPa oder 1 bar - er nimmt mit der Höhe ab und hängt geringfügig vom Wetter (Hoch- oder Niederdruckwetterlage) ab.

Viele Druckmessgeräte haben zwei Anschlussstutzen. So kann man den Druckunterschied oder besser den *Differenzdruck* zwischen zwei beliebigen Messstellen ermitteln. Ein häufiger Spezialfall ist, dass ein Anschlussstutzen mit dem Druck der freien Atmosphäre beaufschlagt wird. Damit bezieht man automatisch jeden - am anderen Stutzen gemessenen - statischen Druck auf den Atmosphärendruck, man spricht dann von *Überdruck*. Wenn ein Autoreifen laut Manometer 2,4 bar Druck anzeigt, sind das in der Regel 2,4 bar Überdruck gegenüber Atmosphäre, also herrscht im Reifen ein Absolutdruck von 3,4 bar.

## 2.3 Dynamischer und Totaldruck

Ist in einem System - im Gegensatz zu vorher - das Fluid nicht mehr in Ruhe, strömt es also, so definiert man zusätzlich den dynamischen Druck. Er berechnet sich aus der Geschwindigkeit des Fluids  $w$  und seiner Dichte  $\rho$ :

$$p_{dyn} \equiv \frac{\rho}{2} w^2 \quad (2)$$

Der dynamische Druck ist eine wichtige Größe in der Strömungsmechanik, da z.B. der Auftrieb eines Tragflügels oder der Druckverlust in einer durchströmten Rohrleitung oft als Bruchteil oder Vielfaches des dynamischen Drucks angegeben werden.

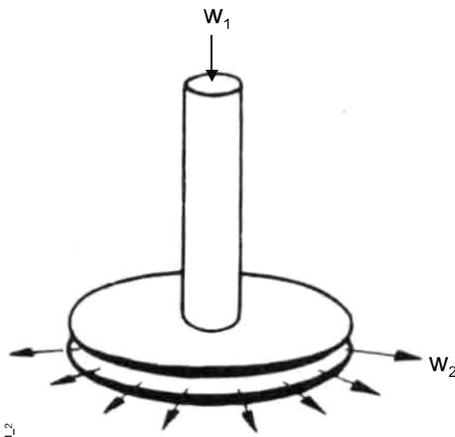
Der *Total-* (oder Gesamtdruck) ist die Summe aus statischem und dynamischem Druck

$$p_t \equiv p + p_{dyn} = p + \frac{\rho}{2} w^2. \quad (3)$$

Wenn man einer Strömung keine Energie zuführt (z.B. durch eine Pumpe) *und* Reibungsfreiheit annimmt, dann bleibt der Totaldruck konstant (Bernoulli-Gleichung):

$$p_1 + \frac{\rho}{2} w_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} w_2^2 \quad (4)$$

Dies erklärt z.B. das hydrodynamische Paradoxon nach Abb. 3: Aus einem Rohr, das am Ende einen kreisförmigen Flansch trägt, strömt ein Fluid gegen eine unter ihm parallel stehende Platte und strömt seitlich mit der Geschwindigkeit  $w_2$  ab. Überraschenderweise wird die Platte nicht abgestoßen, sondern angezogen. Verantwortlich dafür ist der statische Unterdruck im Spalt gegenüber dem Umgebungsdruck, der sich aufgrund der Radialgeschwindigkeit im Spalt einstellt.



**Abb. 3:** Hydrodynamisches Paradoxon

## 2.4 Druckmessung

Allgemein heißen Apparate zu Druckmessung *Manometer*, Geräte, die den Druck in der Erdatmosphäre messen, *Barometer*. Sehr unterschiedliche Prinzipien kommen zur der Druckmessung zu Anwendung, z.B. durch Messung

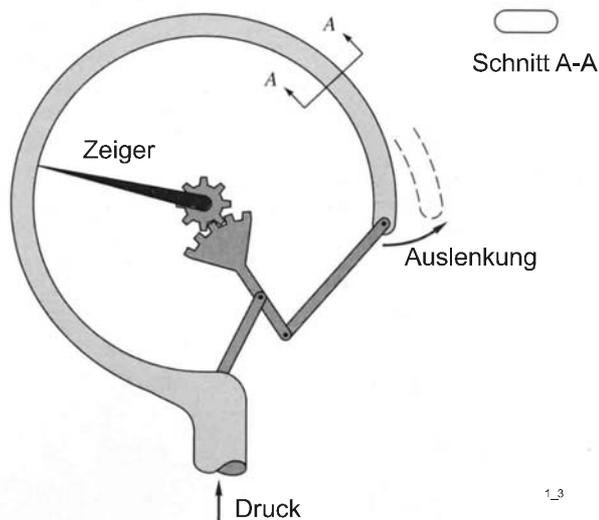
- der Formänderung von Röhren- oder Plattenfedern (Bourdon-Rohr, Abb. 4a)
- durch die Messung der Länge einer Flüssigkeitssäule im Schwerfeld, realisiert z.B. im U-Rohr- und Schrägrohrmanometer (Abb. 5b)
- der Verschiebung, Durchbiegung und Dehnung einer Membran bzw. eines Zylinders, realisiert z.B. in induktiven, kapazitiven oder piezoelektrischen Druckaufnehmern (engl.: pressure transducer), Abb. 4b.

Je nach Bauform können Absolut- oder Differenzdrücke gemessen werden.

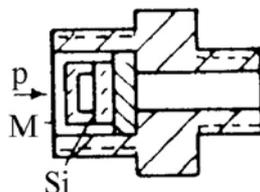
Die Vielzahl der Messprinzipien führt zu einer Fülle von Messsystemen, die für bestimmte Messaufgaben besonders geeignet sind. Auswahlkriterien sind u.a.:

- die Eigenschaften des Fluids (Aggregatzustand, chemische Beschaffenheit, Temperatur)
- der Messbereich
- die Genauigkeit
- der zeitliche Ablauf des Messsignals (stationär, instationär)
- der Systemdruck (bei Differenzdruckaufnehmern)

(a)



(b)



**Abb. 4:**

a) Druckmessung durch Formänderung einer Röhrenfeder (Bourdon-Rohr) (Überdruckaufnehmer)  
b) Membran-Flüssigkeits- oder Gasdruck-Aufnehmer mit der Messmembran M und einem piezoresistiven Siliziummessfühler Si (Absolutdruck-Aufnehmer)

## 2 Versuche

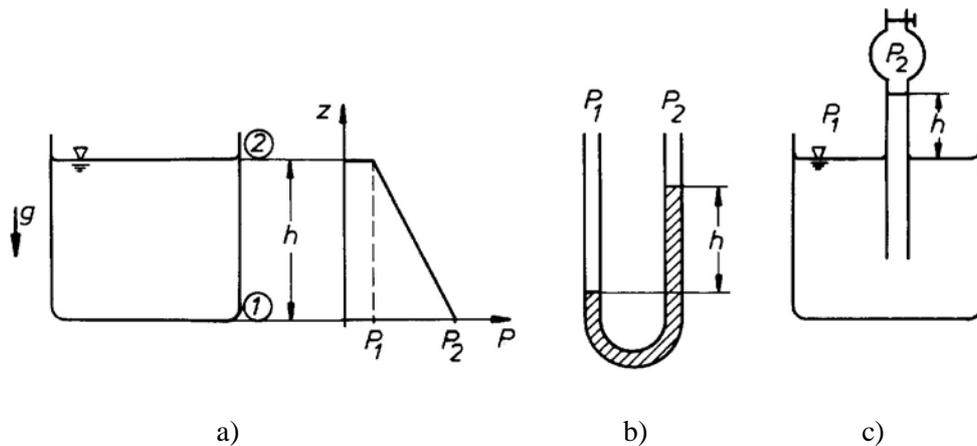
### 2.1 Teilversuch A: Messung des barometrischen Luftdrucks

#### 2.1.1 Grundlagen

Der Druck einer ruhenden Flüssigkeit konstanter Dichte im Schwerfeld nimmt linear mit der Tiefe zu (Abb. 5a):

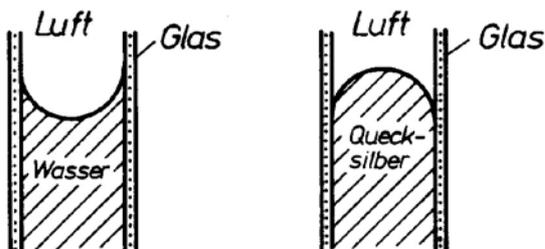
$$\Delta p = p_1 - p_2 = g \cdot \rho \cdot h \quad (5)$$

Dabei sind  $\rho$  die Dichte der Flüssigkeit in  $\text{kg/m}^3$  und  $g$  die örtliche Fallbeschleunigung in  $\text{m/s}^2$ . Eine Druckmessung kann somit auf die Messung der Höhe  $h$  einer Flüssigkeitssäule zurückgeführt werden.



**Abb. 5:** a) Druckverlauf in einer ruhenden Flüssigkeit im Schwerfeld; b) U- Rohr- Manometer, c) Prinzip des Barometers

Am U-Rohr-Manometer (Abb. 5b) ist die Säulenhöhe  $h$  das Maß für die Druckdifferenz  $p_1 - p_2$ . Ist  $p_2 = 0$ , so ist die Steighöhe  $h$  ein Maß für den Absolutdruck  $p_1$ . Nach diesem Prinzip ist das Barometer (Abb. 5c) aufgebaut. Aufgrund von Kapillaritätseffekten bildet sich allerdings ein Meniskus, d.h. die Trennfläche Flüssigkeit/Luft ist gekrümmt: Abhängig von der Materialkombination wird die Wand benetzt oder es entsteht eine Kuppe (Abb. 6), so dass die Steighöhe der Flüssigkeitssäule beeinflusst wird. Für Präzisionsmessungen müssen daher die Kapillaritätseinflüsse korrigiert werden.



**Abb. 6:** Einfluss der Kapillarität

### 2.1.2 Aufbau eines Quecksilber-Barometers

Das in Abb. 7 dargestellte Messgerät erlaubt mit der linken Kapillare die Messung des barometrischen Luftdrucks  $p_b = p_1$ , mit der rechten Kapillare die Messung beliebiger Unterdrücke  $p_2$  gegenüber  $p_1$ . Durch Vergleich der Steighöhen beider Quecksilbersäulen kann auch der Absolutdruck  $p_2$  ermittelt werden. Im vorliegenden Versuch wird nur die linke Kapillare benutzt. Zur genauen Bestimmung des Luftdrucks am Messort sind Korrekturen der abgelesenen Steighöhe  $h$  der Quecksilbersäule notwendig:

$$p_b = h - K_t + K_{g\phi} - K_{gH} + K_K \quad (6)$$

Mit  $K_t$  wird der Einfluss der Temperatur auf die Dichte des Quecksilbers korrigiert.  $K_{g\phi}$  und  $K_{gH}$  berücksichtigen die Abweichung der örtlichen Fallbeschleunigung  $g$  von der Normalfallbeschleunigung  $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$  aufgrund der geographischen Breite und der geodätischen Höhe des Messortes. Mit  $K_K$  wird die Kapillardepression korrigiert.

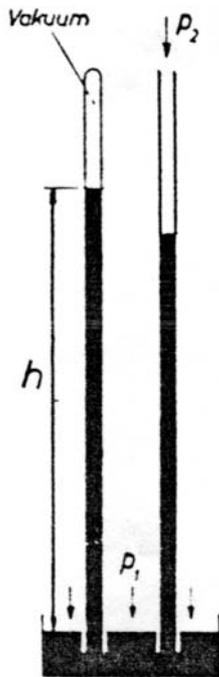


Abb. 7 Quecksilber-Baro-Vakuummeter nach Lambrecht

### 2.1.3 Aufgabenstellung

- Lesen Sie die Steighöhe  $h$  am Barometer ab, messen Sie die Temperatur, bestimmen Sie alle relevanten Korrekturfaktoren und berechnen sie den Luftdruck. Benutzen Sie beiliegendes Mess- und Auswertblatt!
- Bestimmen Sie mit der idealen Gasgleichung

$$\frac{p_b}{\rho} = RT \quad (6)$$

die Dichte  $\rho$  der Luft.  $T$  ist dabei die absolute Temperatur der Luft am Messort in Kelvin (= Temperatur in  $^{\circ}\text{C} + 273,15$ ),  $R$  die Gaskonstante (für Luft  $R = 287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$ ).

## 2.2 Teilversuch B: Kalibrierung eines induktiven Druckaufnehmers mit einer Wassersäule

### 2.2.1 Versuchsaufbau

Zum Einsatz kommt in diesem Versuch ein elektronisches Messsystem. Der Druckaufnehmer ist wie folgt aufgebaut: Das Messfluid wirkt auf eine Membran, deren Auslenkung im Messbereich dem anliegenden Überdruck proportional ist. Dabei liegt an der dem Messfluid abgewandten Seite der Membran Umgebungsdruck an, es wird also der Überdruck gegenüber Umgebung gemessen. Die Membran ist mit einem axial verschiebbaren ferromagnetischen Tauchanker gekoppelt, der im zylindrischen Gehäuse des Druckaufnehmers zwischen zwei Messspulen liegt. Tauchanker und Messspulen bilden eine induktive Halbbrücke, deren Signal im angeschlossenen Messverstärker verarbeitet und angezeigt wird.

Der Druckaufnehmer wird mit dem Druck einer Wassersäule beaufschlagt. Die Wassersäule wird durch einen wassergefüllten vertikalen Schlauch gebildet. Neben dem Schlauch ist eine Skala angebracht, um die Höhe der Säule ablesen zu können. Durch einen Kolben kann die Höhe der Wassersäule verändert werden.

### 2.2.2 Aufgabenstellung

Der Druckaufnehmer einschließlich des angeschlossenen Messverstärkers ist zu kalibrieren. Verändern Sie dazu schrittweise die Höhe der Wassersäule und damit den Kalibrierdruck. Lesen Sie die Höhe der Wassersäule  $h$  und die Anzeigespannung  $U$  am Messverstärker ab. Berechnen Sie den Druck nach Gl. (5). Benutzen Sie das beiliegende Mess- und Auswertblatt! Zeichnen Sie die Kalibrierkennlinie  $\Delta p$  als Funktion von  $U$ . (Nur ein sauberes Diagramm auf Millimeterpapier oder ein Excel-Diagramm sind zulässig!)

Bestimmen Sie letztlich für alle Messpunkte den Kalibrierungsfaktor  $K_i = \Delta p/U$  [Pa/V] der Messkette. Bilden Sie anschließend einen mittleren Kalibrierungsfaktor  $\bar{K}$

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n K_i .$$

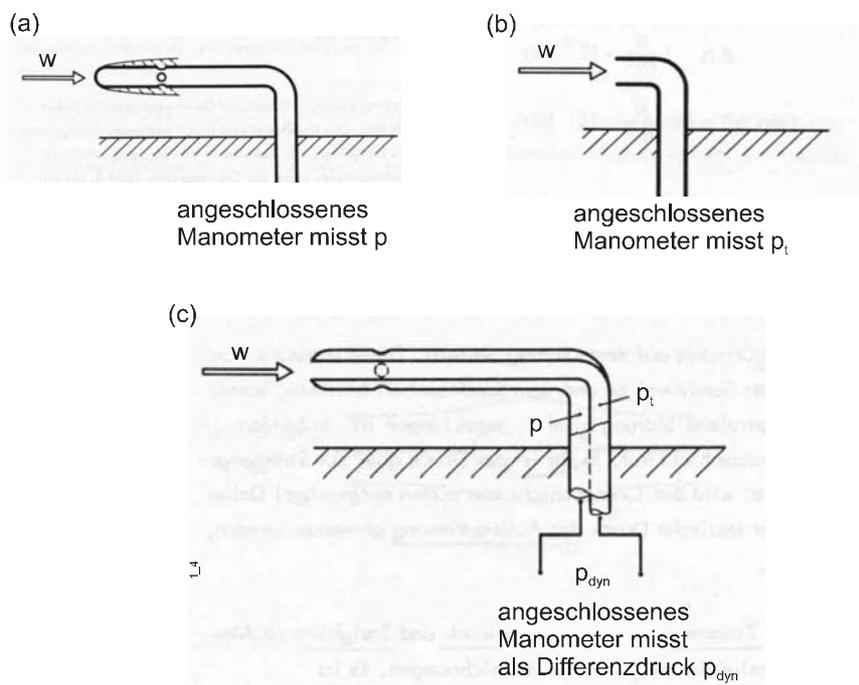
Diskutieren Sie das Ergebnis. Ist der Kalibrierfaktor konstant? Wie groß ist die maximale Abweichung vom mittleren Kalibrierfaktor? Erklären Sie den Begriff der Linearität.

## 2.3 Teilversuch C: Prandtl'sches Staurohr

### 2.3.1 Grundlagen

Die Messung des statischen Drucks  $p$  in einer Strömung kann mit einer *statischen Sonde* und einem Absolutdruck-Manometer erfolgen. Bei der statischen Sonde sind Bohrungen quer zur Strömungsrichtung zur Abnahme des statischen Druckes auf dem Umfang verteilt (Abb. 9a). Den Totaldruck  $p_t$  kann man durch Aufstau der Strömung als den Staudruck vor einem offenen, aber nicht durchströmten Rohr ebenfalls mit einem Absolutdruck-Manometer messen - das offene Rohr heißt *Pitot-Sonde*. Der dynamische Druck  $p_{dyn}$  lässt mit einer Kombination beider Sonden, dem sog. Prandtl'schen Staurohr, ermitteln. Er ist gemäß Gl. (3) der Differenzdruck zwischen den beiden Anschlussstutzen

$$p_{dyn} = p_t - p \quad (3b)$$



**Abb. 9:** a) Statische Sonde, b) Pitot-Rohr, c) Prandtl'sches Staurohr

Als Manometer wird in diesem Versuch ein Betz-Manometer, Abb. 10, benutzt. Das Betz-Manometer ist ein verfeinertes U-Rohrmanometer und arbeitet mit seinen zwei Anschlussstutzen als Differenzdruckmanometer. Die Abtastung des Meniskus erfolgt über einen Schwimmer. Wird Druck über den Druckanschluss E auf die Flüssigkeit mit dem Schwimmer gegeben, so steigt die Flüssigkeit mit dem Schwimmer C im Steigrohr entsprechend des Druckes. Am unteren Ende des Schwimmers ist eine Glasskala angebracht. Die Glasskala wird von hinten durch eine Lampe B beleuchtet und vergrößert auf eine Mattscheibe A projiziert.

Auf der Mattscheibe kann dann der am Anschluss E anliegende Druck abgelesen werden.



## 2.4 Teilversuch D: Messung des Wanddruckverlaufs in einer Venturidüse

### 2.4.1 Versuchsaufbau

Eine Venturidüse aus Plexiglas (Abb. 11) besitzt entlang ihrer axialen Richtung 18 kleine Wandbohrungen. Mit einer Wandbohrung kann der statische Druck in der durchströmten Düse unmittelbar gemessen werden, z.B. hier gleichzeitig an allen Messstellen mit einem Vielfach-U-Rohrmanometer. Die Luftströmung wird durch ein Gebläse erzeugt, das über eine Beruhigungskammer an die Venturidüse angeflanscht ist (Abb. 12).

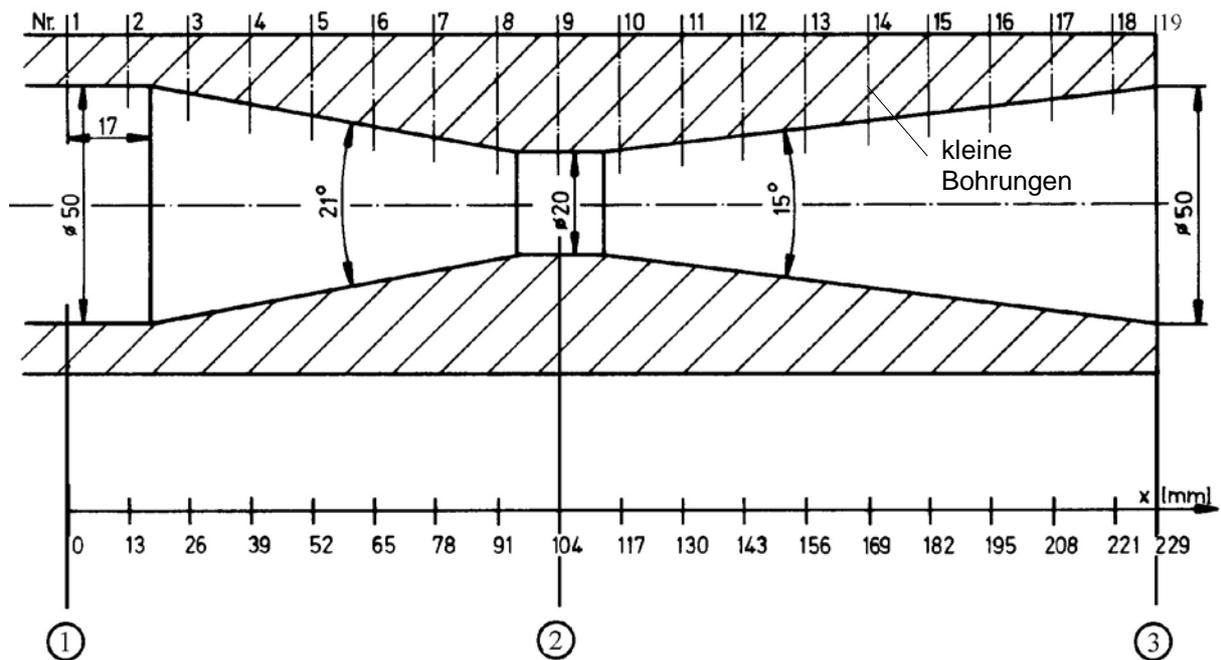


Abb. 11: Venturidüse

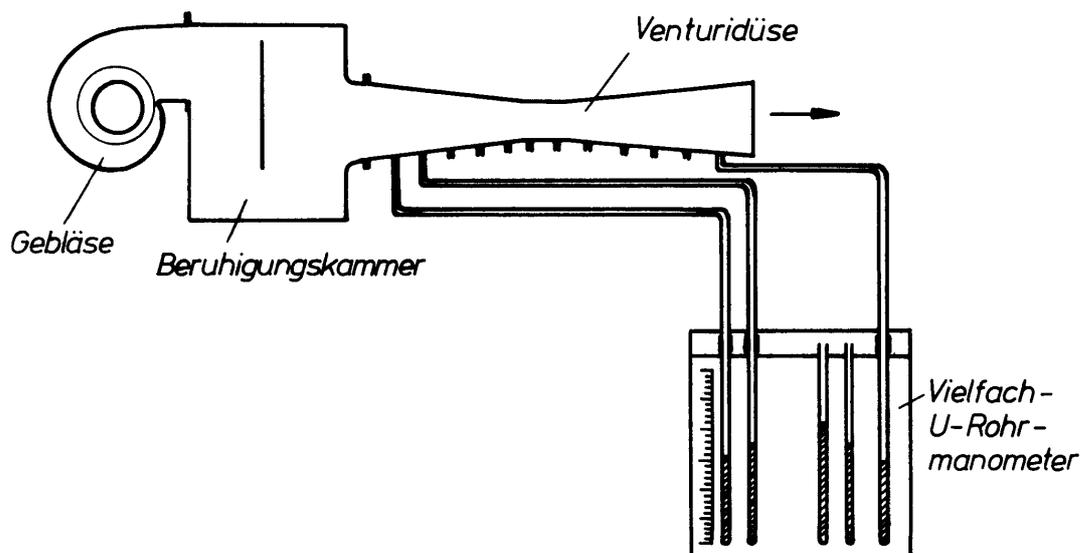


Abb. 12: Versuchsaufbau

### 2.4.2 Aufgabenstellung

Ermitteln Sie vom Ein- zum Austritt der Venturirdüse die Verläufe

- des statischen Drucks
- und des Totaldrucks.

Messen Sie dazu die Wanddrücke als Maß für den statischen Druck an den 18 Messstellen. Danach führen Sie in die Achse eine Pitot-Sonde ein und ermitteln in Höhe jeder Messstelle den Totaldruck. Zeichnen Sie beide Verläufe in ein Diagramm. (Nur ein sauberes Diagramm auf Millimeterpapier oder ein Excel-Diagramm sind zulässig!)

Diskutieren Sie das Ergebnis. Wie ändert sich der statische Druck entlang des Venturirohrs? Bleibt der Totaldruck an allen Messstellen vom Ein- zum Austritt des Venturirohrs konstant, wie in Abschnitt 2.3 behauptet? Wodurch sind Abweichungen erklärbar?

### 3 Versuchsbericht

Der abzugebende Versuchsbericht ist wie folgt zu gliedern:

1. Teilversuch A
  - 1.1 Kurzbeschreibung der Versuchs- und Messeinrichtung und der zu messenden Größen
  - 1.2 Zusammenstellung der für die Auswertung entscheidenden Beziehungen. (Exemplarische Berechnung durchführen!)
  - 1.3 Diskussion der Ergebnisse  
Hier sollen die Ergebnisse und evtl. die Abweichungen von den erwarteten Ergebnissen diskutiert werden, Fehlereinflüsse sind aufzuzählen. Die Antworten auf die Fragen in der Aufgabenstellung sind mit einzubeziehen.
2. Teilversuch B dto.
3. Teilversuch C dto.
4. Teilversuch D dto.
5. Ergebnisse  
(Ausgefüllte Mess- und Auswertblätter und Diagramme)

### 4. Literatur

Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag

Gerthsen, Kneser, Vogel: Physik, Springer-Verlag 1974

White, F.M.: Fluid Mechanics, MacGraw-Hill 2003

Zierrep, J.: Grundzüge der Strömungslehre, Karlsruhe 1992

## 5. Mess- und Auswertblätter

Name: .....

Datum: .....

### 5.1 Teilversuch A

t	h	$K_t$	$K_{g\varphi}$	$K_{gH}$	$K_k$	$p_b$
[°C]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]

### 5.2 Teilversuch B

Wassersäule		Messverstärker	Kalibrierfaktor
h	$\Delta p$	U	
[mm WS]	[Pa]	[V]	-

### 5.3 Teilversuch D

Dichte der Flüssigkeiten in den U-Rohrmanometern:  $\rho_{Fl} = \dots\dots\dots \text{kg/m}^3$

Nr. der Bohrung	x [mm]		p [Pa]		p <sub>t</sub> [Pa]	
1	0					
2	13					
3	26					
4	39					
5	52					
6	65					
7	78					
8	91					
9	104					
10	117					
11	130					
12	143					
13	156					
14	169					
15	182					
16	195					
17	208					
18	221					
19	229					