



---

# Laborprojekt Strömung

LV 319.045

---

---

## *Rohrströmung, Profilströmung*

---

Messen und Auswerten von  
Druck und Geschwindigkeit

---

Einführung

---



# Übungsteil Rohrströmung, Profilströmung

## 1. Lehrziel:

Experimentelles Kennenlernen der Begriffe "Totaldruck", "Totaltemperatur", "Statischer Druck", "Dynamischer Druck", "Dichte", "Volumenstrom", "Massenstrom".

## 2. Allgemeines

Flüssigkeiten und Gase unterscheiden sich im wesentlichen durch ihre geringe bzw. starke Kompressibilität. Sie haben viele gemeinsame Eigenschaften und werden einheitlich als Fluide bezeichnet. Bei vielen Strömungsvorgängen ist die Kompression auch bei gasförmigen Fluiden vernachlässigbar (z.B. wenn Körper von Luft normaler Temperatur und weniger als 0.5-facher Schallgeschwindigkeit umströmt werden). Dann können auch dafür die Gesetze der inkompressiblen Strömung näherungsweise angewendet werden.

## 3. Grundgleichungen

(Kontinuitätsgleichung, Energiegleichung → BERNOULLI)

### Formelzeichen

$A$	Querschnittsfläche	$[m^2]$
$a_t$	spez. technische Arbeit	$[J/kg]$
$\alpha$	Durchflusszahl	$[-]$
$\beta$	Profilbeiwert	$[-]$
$c$	Geschwindigkeit	$[m/s]$
$c_p$	spez. Wärmekapazität	$[J/kgK]$
$D$	Durchmesser	$[m]$
$\varepsilon$	Expansionszahl	$[-]$
$F$	Kraft	$[N]$
$g$	Erdbeschleunigung	$[m^2/s]$
$h$	spez. Enthalpie	$[J/kg]$
$h_t$	spez. Totalenthalpie	$[J/kg]$
$\eta$	dynamische Zähigkeit	$[Ns/m^2]$
$\kappa$	isentropenexponent	$[-]$
$m$	Kontraktionszahl	$[-]$
$\dot{m}$	Massenstrom	$[kg/s]$
$\mu$	Öffnungsverhältnis	$[-]$
$\nu$	kinematische Zähigkeit	$[m^2/s]$



$p$	Druck	[N/m <sup>2</sup> ]
$p_{stat}$	statischer Druck	[N/m <sup>2</sup> ]
$p_t$	Totaldruck (früher Gesamtdruck)	[N/m <sup>2</sup> ] (
$q_a$	spez. äußere Wärme	[J/kg]
$q_r$	spez. Reibungswärme	[J/kg]
$q_{rev}$	spez. reversible Wärme	[J/kg]
$R$	Gaskonstante	[J/kgK]
$r$	Radius	[m]
$Re$	Reynolds-Zahl	[-]
$\rho$	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
$T$	Temperatur	[K]
$T_t$	Totaltemperatur	[K]
$v$	spez. Volumen	[m <sup>3</sup> /kg]
$\xi$	Korrekturfaktor	[-]
$\dot{V}$	Volumenstrom	[m <sup>3</sup> /s]
$x$	Koordinate	[m]
$y$	Koordinate	[m]
$z$	geodätische Höhe	[m]
$z_{T,P}$	Förderhöhe (Pumpe), Nutzhöhe (Turbine)	[m]
$z_v$	Verlusthöhe	[m]

### Kompressible Strömung

$$\rho = f(p, T)$$

### Kontinuitätsgleichung:

$$\dot{m} = \rho cA = const.$$

### Energiegleichung (1.HS – stationärer Fließprozeß):

$$a_t = h_2 - h_1 + g(z_2 - z_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + q_a$$

$$dq_{rev} = h_2 - h_1 - \int v dp = q_a + q_r$$

$$a_t = \int v dp + q_r + g(z_2 - z_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$$

### Inkompressible Strömung

$$\rho = const.$$

### Kontinuitätsgleichung:

wegen  $\rho = const.$

$$\Rightarrow \frac{\dot{m}}{\rho} = \dot{V} = cA = const. \quad (stationär)$$

### Energiegleichung (Bernoullische Gleichung):

$$a_t = \frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + q_R$$

$$z_{T,P} = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + z_v \quad z_{T,P} = 0$$

$$z_{T,P} = 0 \quad z_{Verlust} = 0$$

$$a_t = 0 \quad q_a = 0 \quad gz \ll$$

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{c^2}{2g} + z = \text{const.} \quad (\text{Bernoulli})$$

$$h + \frac{c^2}{2} = h_t = \text{const.}, \quad \text{mit } h = c_p T$$

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

$$T + \frac{c^2}{2} = T_t = \text{const.}$$

Bernoulli:

$$\frac{p}{\rho g} = \text{Druckhöhe},$$

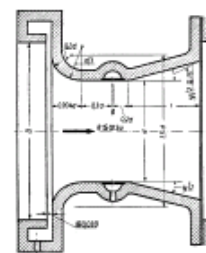
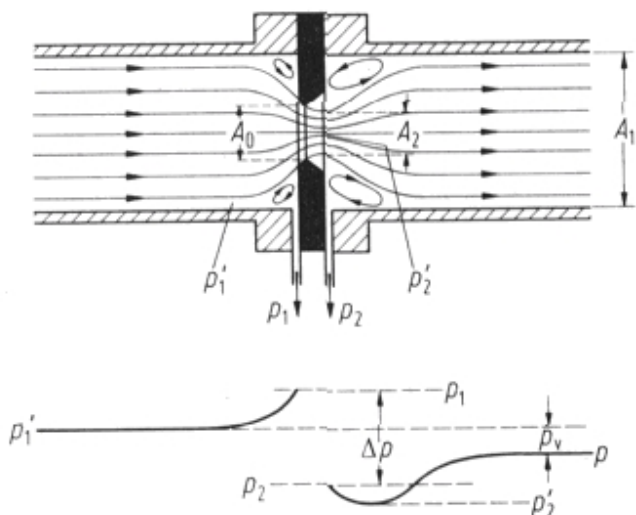
$$p = \text{statischer Druck}$$

$$\frac{c^2}{2g} = \text{Geschwindigkeitshöhe}, \quad \rho \frac{c^2}{2} = \text{dynamischer Druck}$$

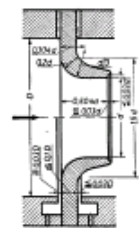
d.h., im waagrechteten Rohr ist der Totaldruck, d.h. die Summe aus statischem Druck und dynamischen Druck immer konstant (unter Vernachlässigung aller Verluste).

## 4. Messung des Massenflusses mittels Blende

Die an der Verengung einer Rohrleitung auftretende Druckdifferenz steht nach der Gleichung von Bernoulli in Beziehung zur Strömungsgeschwindigkeit und damit zum Durchfluß. Wegen ihrer kurzen Einbaulänge sind die Normblenden preiswert, verursachen aber einen großen Druckabfall in den Rohrleitungen gegenüber z.B. den Normdüsen oder Normventuridüsen.



(Kurz-)Venturidüse



Normdüse

Normgerechter Einbau der Normblende:  
Rohrlänge vor der Blende mindestens 10 D,  
nach der Blende mindestens 5 D  
ungestörte Strömung!

Abbildung 1 Stromfaden in Wandnähe (ergänze: Stromfaden in Rohrmitte!)



Für den Volumenstrom gilt, wobei  $\mu$  die Kontraktionszahl ist:

$$\mu = \frac{A_2}{A_0} < 1$$

$$\dot{V} = \mu A_0 c_2$$

Die Bernoulli-Gleichung von 1 nach 2 lautet:

$$p_1 + \rho \frac{c_1^2}{2} = p_2 + \rho \frac{c_2^2}{2}$$

Die Geschwindigkeit  $c_1$  kann mit dem Öffnungsverhältnis  $m = A_0/A_1$  und der Kontraktionszahl  $\mu$  ausgedrückt werden:

$$c_1 = c_2 \frac{A_2}{A_1} = c_2 \mu m$$

In die Bernoulli Gleichung eingesetzt, kann man damit die mittlere Geschwindigkeit  $c_2$  im engsten Querschnitt ausrechnen.

Mit  $\beta_1$  und  $\beta_2$ , das sind Profilbeiwerte der Strömung in der ungestörten Strömung und im engsten Querschnitt, erhält man:

$$p_1 + \rho \frac{\beta_1 \mu^2 m^2 c_2^2}{2} = p_2 + \rho \frac{\beta_2 c_2^2}{2} \Rightarrow c_2$$

womit der Volumenstrom berechnet werden kann:

$$\dot{V} = \mu A_0 c_2 = \frac{\mu A_0}{\sqrt{\beta_2 - \beta_1 m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_2' - p_1')}$$

Die Druckentnahmestellen liegen in der Praxis an der Stirn- und Rückseite der Blende und liefern die Drücke  $p_1$  und  $p_2$  (Abb. 1)

Wird deren Differenz in die Durchflußgleichung eingesetzt, so muß sie durch einen Beiwert  $\xi$  berichtigt werden.

$$\dot{V} = \frac{\mu A_0 \xi}{\sqrt{\beta_2 - \beta_1 m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1' - p_2')} = \alpha A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}$$

Die Korrekturfaktoren und das Öffnungsverhältnis werden zur dimensionslosen Durchflußzahl  $\alpha = f(m^2, \text{Re})$  zusammengefaßt.

Bei kompressiblen Stoffen tritt zu  $\alpha$  noch die Expansionszahl  $\varepsilon$ . Damit wird:

$$\dot{V} = \alpha \varepsilon A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)}$$



Den Massenstrom erhält man durch Multiplikation des Volumenstroms mit der Dichte des Mediums:

$$\dot{m} = \dot{V}\rho .$$

#### 4.1 Berechnung der Dichte

Bei der Bestimmung des Massenstroms setzt man die Kenntnis der Dichte  $\rho$  voraus.

Ausgehend von der allgemeinen Gasgleichung kann man bei Kenntnis der Totaltemperatur  $T_t$  und des Totaldruckes  $p_t$  die totale Dichte berechnen.

$$pv = RT \text{ bzw. } \rho_t = \frac{p_t}{RT_t}$$

Über die Isentropen-Gleichung lässt sich dann die Dichte  $\rho_1$  errechnen:

$$pv^\kappa = p \left( \frac{1}{\rho} \right)^\kappa = const. \quad \text{bzw.} \quad \rho_1 = \rho_t \left( \frac{p_1}{p_t} \right)^{\frac{1}{\kappa}} .$$

#### 4.2 Anpassung an die neuen Norm

Die beschriebene Berechnung des Massenstroms entspricht den VDI-Durchflußmeßregeln der Norm DIN 1952 (1. Ausgabe 1928, vorliegend 6. Ausgabe 1948-06) und der VDI/VDE 2040, „Berechnungsgrundlagen für die Durchflußmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren“ sowie VDI/VDE 2041, 1991-04 „Durchflußmessung mit Drosselgeräten: Blenden und Düsen für besondere Anwendungen“.

Dies wurden ersetzt durch die Norm:

DIN EN ISO 5167-1, 2004-01 „Durchflusssmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Anforderungen (ISO 5167-1:2003);

Damit ändern sich auch einige Bezeichnungen, die in dieser Vorlage noch nicht berücksichtigt wurden:

DIN 1952		EN ISO 5167		Zusammenhang
Bezeichnung	Formelzeichen	Bezeichnung	Formelzeichen	
Öffnungsverhältnis	$m = \frac{A_{bl}}{A_1}$	Durchmesser- verhältnis	$\beta = \frac{d}{D}$	$\beta = \sqrt{m}$
Durchflusszahl	$\alpha$	Durchflusskoeffizient	$C$	$C = \alpha \cdot \sqrt{1 - m^2}$ $C = \alpha \cdot \sqrt{1 - \beta^4}$

Zur Bestimmung des Durchflußkoeffizienten  $C$  und der Expansionszahl  $\epsilon$  sind in dieser Norm neue Näherungsfunktionen angegeben (s.d.).

## 5. Bestimmung des Volumenstromes – Netzmessung

### Arithmetische Integration mit Randwertkorrektur nach VDI/VDE 2640

Zur Bestimmung des Volumenstroms wird der Leitungsquerschnitt in Teilflächen unterteilt und in deren Schwerpunkt – Schnittpunkt der Meßgeraden mit der Schwerlinie) die Geschwindigkeit gemessen (z.B. mit Sonde, s.d.). Der Volumenstrom wird dann durch Integrieren der Geschwindigkeitsverteilung ermittelt.

#### 5.1 Anordnung der Meßpunkte bei Kreisquerschnitt

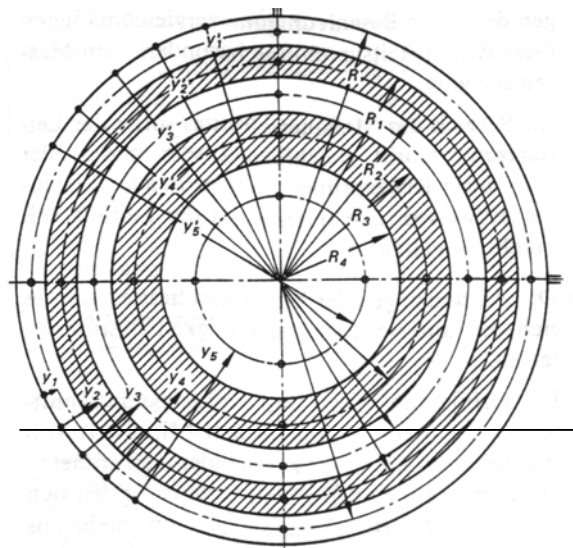
Im Kreisquerschnitt ist die Geschwindigkeitsverteilung bei ungestörter Strömung rotationssymmetrisch, daher können die Messpunkte in Umfangsrichtung in größeren Abständen angeordnet sein. (In unserem Fall ist wegen der speziellen Anordnung der Sonden - Verstellmöglichkeit nur in der vertikalen Meßgeraden - der Abstand der Meßpunkte  $\varphi = r_i \pi$ , d.h. 2 Meßpunkte pro Fläche)

$$\frac{r_i}{r} = \sqrt{1 - \frac{1}{n}}$$

$n$ .....Anzahl der Meßflächen ( $n = 3$  bei gleichförmigem Profil),  $i = 1, \dots, n$

#### Abbildung 2

Anordnung der Meßpunkte (hier 5 Teilflächen, entnommen der VDI/VDE 2040);  
wir beschränken uns hier auf drei Kreisringflächen,  $n = 3$ )



Wandabstände der Meßpunkte, die für die Sondeneinstellung maßgebend sind:

$$\frac{y_i}{D} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2i-1}{2n}} \right] \quad \text{bzw.} \quad \frac{y'_i}{D} = 1 - \frac{y_i}{D}$$

## 5.2 Geschwindigkeit in Wandnähe – Randwertkorrektur

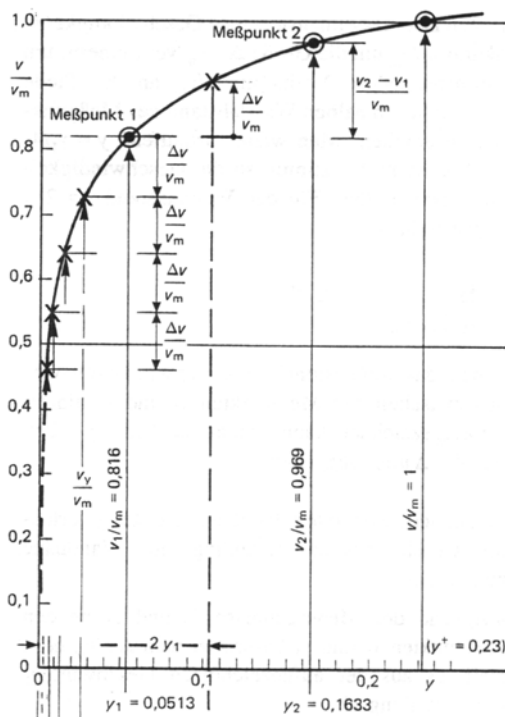
Bei ausgebildeter turbulenter Strömung läßt sich die Geschwindigkeitsverteilung in Wandnähe durch Messung der wandnächsten Punkte ( $c_1$  und  $c_2$ ) unter der Annahme logarithmischer Verteilung angeben. Die Randzone wird durch die Korrekturgröße

$$(\bar{c}_2 - \bar{c}_1) \frac{k}{n}$$

berücksichtigt, die von der mittleren Geschwindigkeit abgezogen wird.

Der Randzonen-Korrekturfaktor beträgt bei Kreisquerschnitt und

$$n = 3 \Rightarrow \frac{k}{n} = 0.08404 \quad (\text{VDI 2040, Blatt 3})$$



**Abbildung 3 Randzonenkorrektur**

Bestimmen der Geschwindigkeiten in Wandnähe.

Lage der Meßpunkte 1 und 2

Die Korrektur der mittleren

Geschwindigkeit ergibt sich aus

Der Integration der logarithmischen

Geschwindigkeitsverteilung in der

Randzone.

## 5.3 Mittlere Geschwindigkeit - Auswertung der Messung

Die Auswertung erfolgt mit der bezogenen Größe  $c_i/c_0$ , d.h. die Geschwindigkeiten werden auf einen Referenzwert  $c_0$  bezogen, der üblicherweise in der Mitte des Querschnitts ermittelt wird. Auf diese Weise können Geschwindigkeitsänderungen während der Messung ausgeglichen werden.





Durch den Bezug auf den Referenzwert entsteht eine „normierte“ Geschwindigkeitsverteilung mit dem Maximalwert „1“, die auch für spätere Messungen, z.B. bei der Mengestromüberwachung verwendet

werden kann, wenn der Durchsatz nicht zu sehr vom Meßzustand entfernt liegt.

Wir nehmen an, daß konstante Strömung vorliegt (keine wesentliche Temperaturänderungen) und verzichten auf die Referenzmessung.

Wir erhalten die mittleren Geschwindigkeiten in den Ringflächen  $\bar{c}_i = \frac{1}{z_i} \sum_1^z c_i$

bzw. im Kreisquerschnitt :  $\bar{c} = \frac{1}{z} \sum_1^z c_i$

$$z = n z_i \quad z_i, \dots \text{Anzahl der Meßpunkte in einer Fläche}$$

Die korrigierte mittlere Geschwindigkeit wird dann durch Reduktion um die Korrekturgröße berechnet:

$$c_m = \bar{c} - (\bar{c}_2 - \bar{c}_1) \frac{k}{n}$$

## 5.4 Berechnung des Volumenstroms

Der Volumenstrom wird mit der so erhaltenen mittleren Geschwindigkeit ermittelt:

$$\dot{V} = c_m A \text{ [m}^3/\text{s]} = 3600 \cdot c_m A \text{ [m}^3/\text{h]}$$

wobei A die Kreisquerschnittsfläche des Meßrohres darstellt.

Um die Meßwerte vergleichen zu können, wird der Volumenstrom, der mit den örtlichen Zustandswerten berechnet wurde, auf Normwerte bezogen und umgerechnet:

"Normvolumenstrom" bei Normwerten  $t = 0^\circ\text{C}$  bzw.  $T_N = 273 \text{ K}$  (siehe Beilage im Anhang):

$$p_N = 1013 \text{ mbar} \rightarrow \frac{T_N}{p_N} = 0.2695 \quad \dot{V}_N = \dot{V} \cdot 0.2695 \cdot \frac{p_1 [\text{mbar}]}{T_1 [\text{K}]} \text{ m}^3_{\text{n}} \text{ „Norm-m}^3\text{“}$$

## 6. Profildruckmessung

An der Meßschaufel in der Schaufellade der subsonischen Kaskade befinden sich 26 Meßbohrungen (siehe Skizze). Mit Hilfe eines Druckmeßmoduls werden die statischen Druckwerte an diesen Bohrungen sequentiell gemessen. Die Meßwerte werden digitalisiert und an einen Meß- PC übertragen, wo sie gespeichert und weiterverarbeitet werden können.

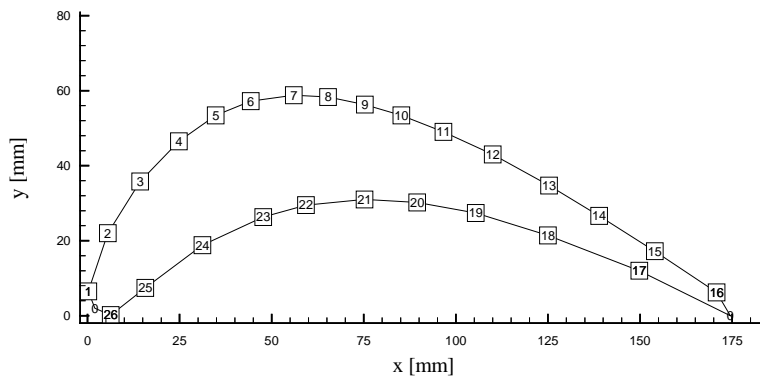


Abbildung 4 Schaufel mit den Positionen der Meßbohrungen am Umfang

### 6.1 Berechnung des Profildruckpunktes und des resultierenden Kraftvektors

Es wird vorausgesetzt, daß die an den einzelnen Meßbohrungen gemessenen Drücke in Bereichen um die Bohrungen konstant sind, wie es in der folgenden Abbildung dargestellt ist.

Die pro Längeneinheit auf den Bereich um eine Meßbohrung wirkenden Kräfte in  $x$ - und  $y$ - Richtung werden wie in der Skizze dargestellt berechnet und an der Stelle der Meßbohrung angebracht.

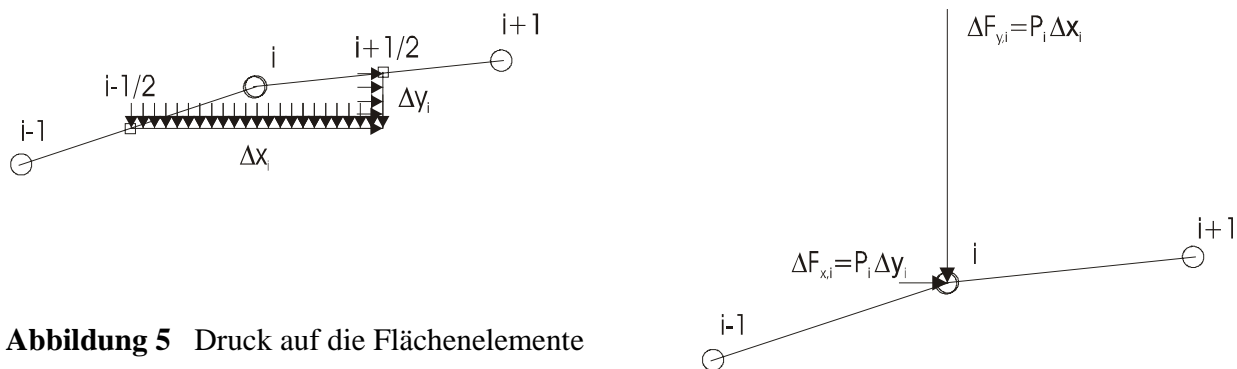
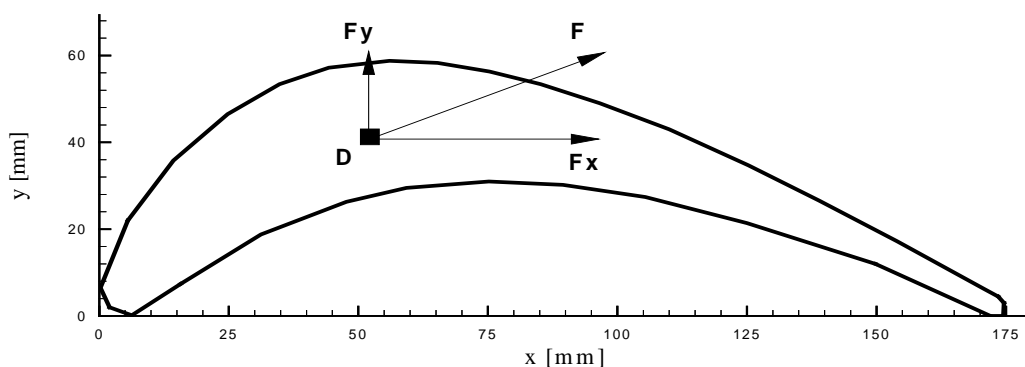


Abbildung 5 Druck auf die Flächenelemente  
und die daraus resultierende Kräfte

Die Summation der Kräfte in  $x$ - und  $y$ - Richtung ergibt die  $x$ - und  $y$ - Komponenten der resultierenden Druckkraft.

Aus den Momentengleichgewichten gebildet mit den Kräften in  $x$ - und  $y$ - Richtung lassen sich die Koordinaten des Druckpunktes bestimmen.



**Abbildung 6** Kraft und Kraftangriffspunkt auf der Schaufel

Die Druckverteilung wird sichtbar gemacht durch Verbindung der Meßbohrungen mit einer Reihe von wassergefüllten Glasröhren die die Schenkel eines U-Rohr-Manometers mit einem gemeinsamen offenen Rohr bilden. Der relative Über- oder Unterdruck auf der Profilloberfläche senkt oder hebt den Spiegel um die Null-Lage und kann in mm-Wassersäule abgelesen werden.

Diese Auswertung ist sehr zeitaufwendig und fehlerbehaftet – der Spiegel fluktuiert sehr stark – und wird daher nicht weiter verfolgt.

Die Änderung der Druckverteilung bei Verdrehen der Schaufellade (s.d.) ist jedoch sehr eindrucksvoll und gibt einen guten Überblick über die Strömungsverhältnisse bei umströmten Turbinenschaufeln.

(Das Profil ist der Mittelschnitt des im Labor ausgestellten Gasturbinenläufers, der in der OMV die bei der Verbrennung der nichtkrackbaren Bestandteile des Erdöls entstehenden Gase abgearbeitet hat.

Siehe Erosionsspuren der staubhaltigen Verbrennungsgase!)

Die Auswertung der Ergebnisse dieses Übungsteils erfolgt rechnerunterstützt. Die Drücke werden mittels eines Druckmeßdosensystems (Scanivalve SSS48 C MK4) der Reihe nach erfaßt (je 10 Werte werden gemittelt) und dann in einer Datei abgelegt.

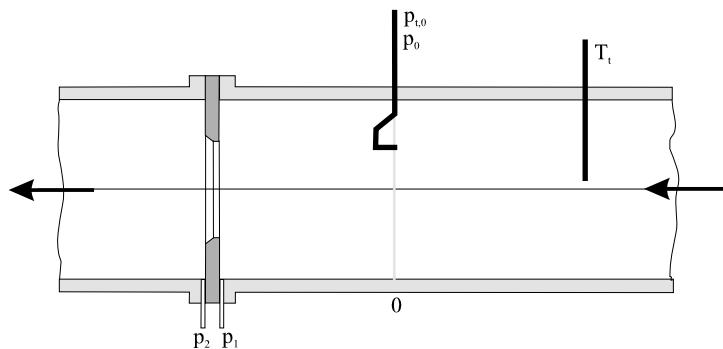
Mittels Excel-Tabellenkalkulation können dann die oben beschriebenen Druckverteilungen und Kräfte berechnet werden. (Anhang)

## 7. Beschreibung der Versuchseinrichtung

### 7.1 Subsonische Kaskade

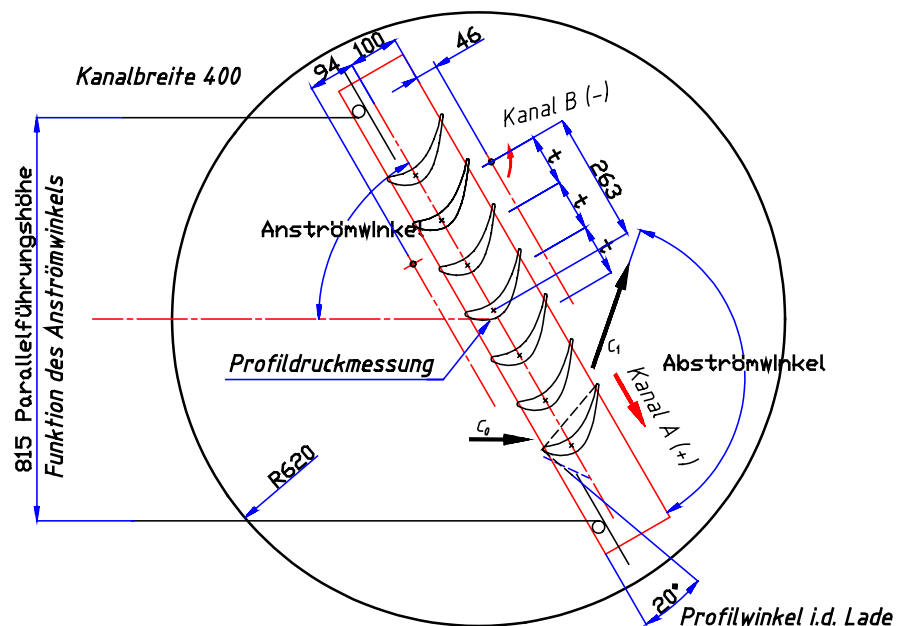
Der für diese Messungen verwendete Windkanal besteht aus einem E-Motor (Elin 3Phasen-Asynchronmotor mit Schleifringläufer, 125 kW, Nenndrehzahl 2935 U/min, Drehzahlregelung mit abgestuften Widerständen), einem doppelflutigen Radialverdichter, einer Umlenkklappe, einem Diffusor, und einer Meßstrecke, in der sich eine drehbare Schaufellade zur Profilströmungsmessung befindet).

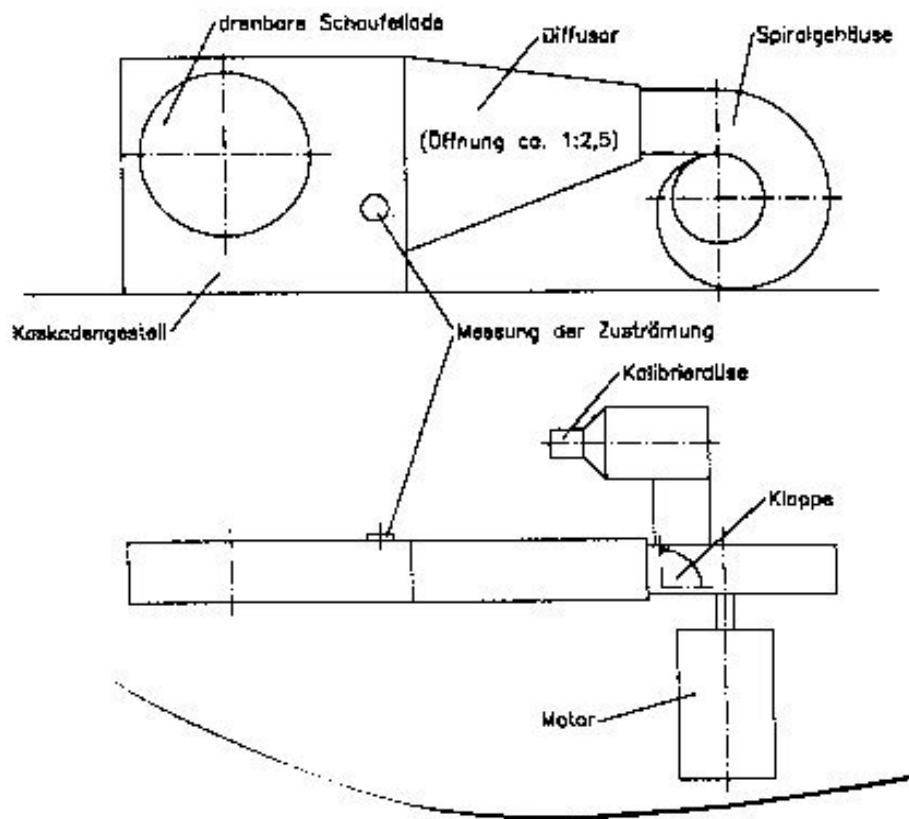
Für die Messung der Rohrströmung und des Massenflusses ist ein Rohrstück mit einer Blende an der Kalibrierdüse montiert.



**Abbildung 7** Normdüse mit den Druckentnahmestellen, Position der Druckmeßsonde und des Thermoelements zur Temperaturmessung vor der Blende

**Abbildung 8** Schaufellade mit der Meßschaufel in der Mitte, Verstellmöglichkeit des Anströmwinkels durch Verdrehen der Kaskade (= Schaufelreihe)



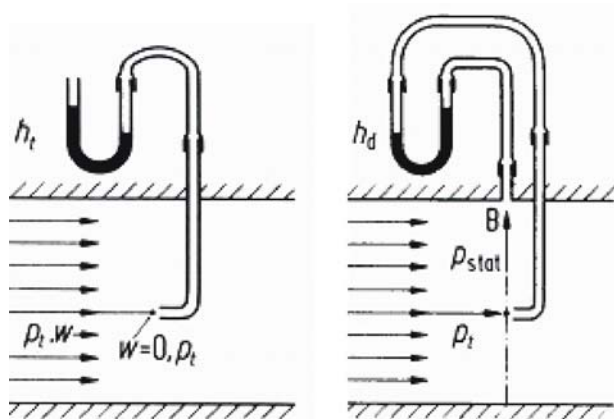


**Abbildung 9** Skizze des Versuchsstandes „Subsonische Kaskade“  
(das Meßrohr an der Kalibrierdüse ist nicht eingezeichnet)

## 7.2 Sonden

### 7.2.2 Pitot-Rohr

Dies ist eine Sonde für den Totaldruck und als Haken ausgebildet, der in die zu messende Strömung eintaucht.



**Abbildung 10**

links: Für Totaldruckmessung ( $p_{tot}$ )  
rechts: durch Verbindung mit einer  
Wanddruckentnahmestelle ( $p_{stat}$ )  
Darstellung des Geschwindigkeitsdrucks  
( $p_{dyn}$ ).

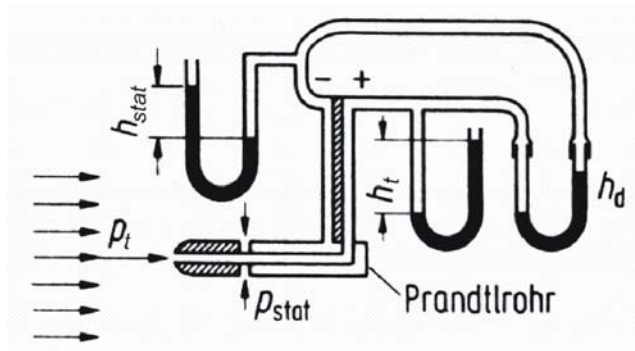
### 7.2.3 Prandtl-Rohr

Durch Kombination des Staurohres mit einer als Ringspalt oder Lochkranz ausgebildeten Sonde zur Messung des statischen Drucks ist es möglich, den Staudruck als Druckdifferenz zu messen.

Staurohre sind recht unempfindlich gegen Schräganströmung.

**Abbildung 11**

Prandtl – Rohr - Sonde



### 7.2.4 3-Lochsonde

#### Prandtlrohr mit 2 zusätzlichen Bohrungen zur Richtungsbestimmung

Zur Richtungsmessung in einer Ebene ist eine 2-Lochsonde ausreichend. Die beiden Bohrungen werden dabei in einem Winkel von  $45^\circ$  zur Anströmrichtung angeordnet. Die Sonde wird solange gedreht bis der Differenzdruck zu Null wird, d.h. die beiden Bohrungen haben die selben Anströmbedingungen. Verbindet man diese 2-Lochsonde mit einem Prandtl-Rohr, so kann man neben der Richtungsmessung auch Totaldruck, Statischen Druck und Dynamischen Druck messen.

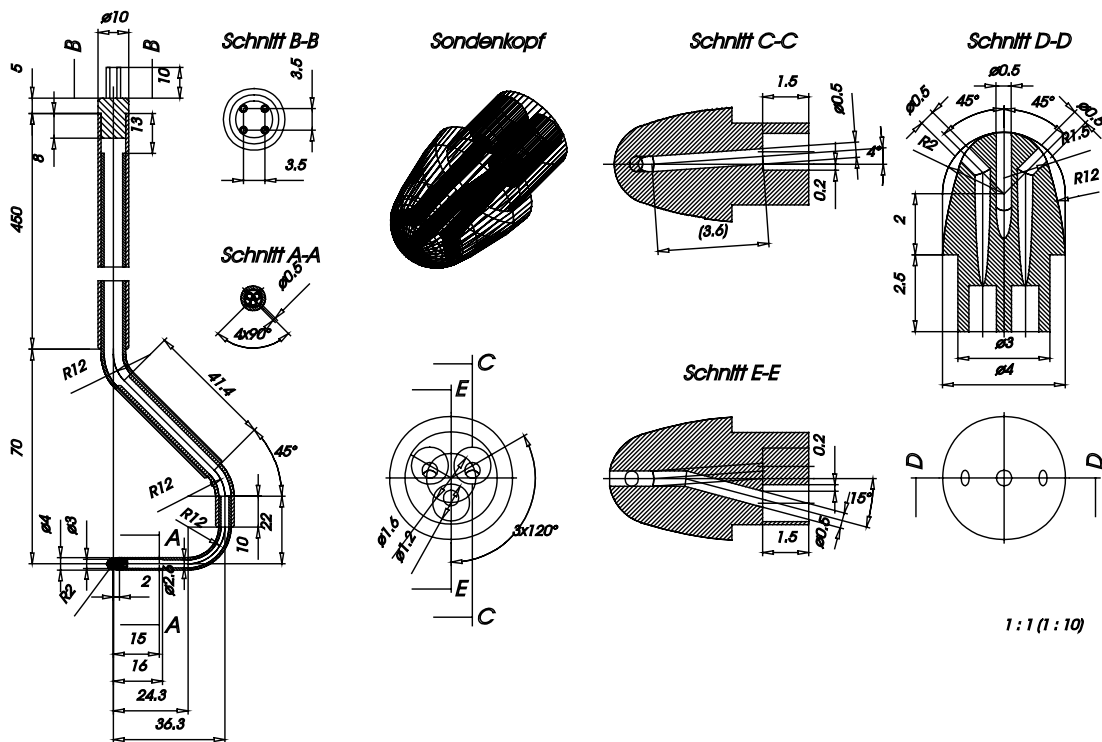


Abbildung 12 3-Loch-Sonde zur Strömungsrichtungsmessung mit Maßdetails

### 7.3 Thermoelemente

Sie beruhen auf dem thermoelektrischen Effekt und bestehen aus Drähten zweier verschiedener Materialien A und B, die so zusammengelötet werden, daß eine Meßlötstelle und eine Vergleichslötstelle entstehen.

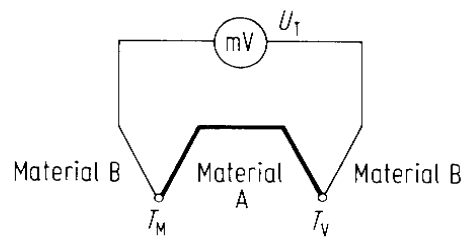


Abbildung 13 Schaltschema Thermoelement

Herrschen an den beiden Lötstellen ungleiche Temperaturen  $T_M$  und  $T_V$ , so tritt zwischen den äußeren Drähten eine Potentialdifferenz  $U_T$  auf, die zu  $T_V$  und der Differenz  $T_M - T_V$  in einer für die Materialkombination spezifischen Beziehung steht. Legt man die Vergleichstemperatur  $T_V$  fest, so ist die Spannung  $U_T$  eine Funktion der Temperatur der Messstelle.



## 8. Aufgaben

In diesem Übungsteil sind an drei Stationen folgende Messungen durchzuführen und auszuwerten:

- 1) Messung des Totaldrucks und der Totaltemperatur zur Bestimmung der Dichte des Mediums.
- 2) Bestimmung des Massenstromes durch Messung der auftretende Druckdifferenz in einer Blende.
- 3) Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung in einer Rohrströmung durch Messung von statischem Druck und Totaldruck.
- 4) Bestimmung des Volumenstromes durch arithmetische Integration der Geschwindigkeitsverteilung.
- 5) Bestimmung der Druckverteilung um ein Schaufelprofil und Berechnung der Schaufelkraft durch Integration  $F_{x,y} = \oint p dA_{x,y}$ .

## 9. Literatur

DIN 1952, VDI-Durchflußmeßregeln, 1948-09 (6. Ausgabe) (1. Ausgabe 1928)  
Regeln für die Durchflußmessung mit genormten Düsen, Blenden und Venturidüsen

VDI/VDE 2040, Richtlinie, mehrere Ausgaben

"Berechnungsgrundlagen für die Durchflußmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren"

VDI/VDE 2041, Technische Regel Ausgabe : 1991-04

Durchflußmessung mit Drosselgeräten; Blenden und Düsen für besondere Anwendungen

DIN EN ISO 5167-1, 2004-01

Durchflussmessung von Fluiden mit Drosselgeräten in voll durchströmten Leitungen mit Kreisquerschnitt - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Anforderungen (ISO 5167-1:2003);  
Deutsche Fassung EN ISO 5167-1:2003

VDI/VDE 2640 Blatt 3 Technische Regel , 1983-11

Netzmessungen in Strömungsquerschnitten; Bestimmung des Gasstromes in Leitungen mit Kreis-, Kreisring- oder Rechteckquerschnitt

## 10. Sicherheit

An dieser Stelle wird nochmals auf die **allgemeinen Verhaltensmaßnahmen** hingewiesen.

Vor allem das **Rauchverbot** ist strikt einzuhalten.

Die Betreuer der Meßübungen weisen überdies vor dem Betreten der Labors auch auf die **speziellen Gefahren** im Versuchsbereich hin.

Um Ihnen einen gefahrlosen Meßvorgang zu ermöglichen, **ist diesen** daraus abgeleiteten **Anordnungen unbedingt Folge zu leisten!**





## Anhang

### Anhang 1: Richtlinie zur Ausarbeitung des Laborberichtes

Die Ausarbeitung des Laborberichtes durch die Studierenden beginnt bei der Darstellung der eingesetzten Methodik, der Beschreibung des **Versuchsaufbau und -durchführung**, ggfs. anhand einer normgerechten Skizze samt Darstellung der Messstellen und der verwendeten Geräte. Unter Umständen kann die Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Geräteliste in einem eigenen Unterkapitel erfolgen. Zusätzlich können hier Kommentare untergebracht werden, durch die der Leser einen Eindruck über die Sorgfalt der Messung gewinnen kann. Zum Beispiel kann hier das Ablesen quasistationärer Messwerte durch Mittelwertbildung während der Messdauer eines Messpunktes, oder das Abwarten des „stationären“ Zustandes beschrieben werden.

Allerdings ist die Formulierung kurz und zweckmäßig zu halten. Umfangreiche Geräte- bzw. Softwarebeschreibungen, mathematische Beweisführungen sowie detaillierte technische Zeichnungen o.ä. sind im Anhang unterzubringen.

Im Kapitel **Versuchsergebnisse und Diskussion** werden die Ergebnisse folgerichtig in ihrem logischen Ablauf präsentiert. Die durchgeführten Berechnungen sind so darzustellen, dass anhand mindestens eines Messpunktes die komplette Auswertung vom gemessenen Wert bis zum Ergebnis schlüssig nachvollzogen werden kann. Alle Messwerte (inklusive „Ausreißern“, die später auszuschneiden sind) werden tabellarisch zusammengestellt. Die Tabellen sind zu benennen und zu nummerieren. Die tabellierten Größen sind in der Tabellenüberschrift zu erläutern sowie die Einheiten anzugeben. Die Tabellenstruktur wird durch Linien klar vorgegeben. Notwendige Abbildungen oder Diagramme sind unter dem Bild zu nummerieren. Eine erklärende Bildunterschrift ist vorteilhaft. Die Koordinatenachsen der Diagramme sind in positiver Richtung mittels Pfeilen zu kennzeichnen und entsprechend den dargestellten Größen linear oder logarithmisch zu skalieren. An jeder Skale ist das entsprechende Größensymbol samt Einheit anzuordnen. Die Diagramme sind sauber mittels Computer oder auf Millimeterpapier zu erstellen. Die Messwerte sind als Punkte klar erkenntlich darzustellen. Ausgleichskurven sind unter Verwendung von Kurvenlinealen einzuzichnen. Allfällige Beobachtungen während der Durchführung des Versuches sind hier zu vermerken. Fehlerabschätzungen oder Erklärungen von Konstruktionen können dieses Kapitel bereichern.

In der **Zusammenfassung** der Messergebnisse werden die wichtigsten Ergebnisse noch einmal gemäß der Aufgabenstellung erläutert. Hier können Hinweise auf auszuschneidende Messpunkte gegeben und Interpretationen für allfällige unerklärliche Messergebnisse versucht werden. Auch eine Fehlerabschätzung oder ein **Ausblick** auf erforderliche Folgeprojekte können hier einfließen.

Werden elektronische Datenträger beigelegt, ist auf normgerechte Formatierung zu achten. Die Daten sind in gängigen Formaten zu speichern (ggfs. pdf-Dateien für Textdokumente).



## Anhang 2

Laborprojekt – Protokoll Übersicht:

### Inhalt

1. Aufgabenstellung
2. Einleitung / Grundlagen
3. Eingesetzte Methodik / Versuchsaufbau mit Geräteliste
4. Ergebnisse und Diskussion der Ergebnisse
5. Zusammenfassung
6. Literatur

ANHANG:

Auswertebblätter und Tabellen/Diagramme

Zustand der Luft (trocken und feucht)

Fehlerberechnung



## Messung des Massenstroms mittels Blende

### Werte vom Prüfstand

Motorleistung Stufe:

	Sonde (relativer Druck)		Blende (relativer Druck)	
$t_t$ [°C]	$p_{t,0}$ [mmWS]	$p_{stat,0}$ [mmWS]	$p_1$ [mmWS]	$\Delta p = p_1 - p_2$ [mmWS]

### Umrechnung auf SI-Einheiten und Berücksichtigung des Umgebungsdrucks

$$T[\text{K}] = t[^\circ\text{C}] + 273.15$$

$$1 \text{ mmWS} = 0.0981 \text{ mbar} = 9.81 \text{ Pa}$$

$$p_{abs} = p_{rel} + p_{Umgebung} \quad p_{Umgebung} = \quad \text{mmHg (Torr)} = \quad \text{Pa}$$

	Sonde (absoluter Druck)		Blende (absoluter Druck)	
$T_t$ [K]	$p_{t,0}$ [Pa]	$p_{stat,0}$ [Pa]	$p_1$ [Pa]	$\Delta p = p_1 - p_2$ [Pa]

### Berechnung der Dichte des Mediums an der Stelle 0 (Sonde)

Mit der Näherung  $T \approx T_t$  kann man aus der allgemeinen Gasgleichung die Dichte  $\rho$  berechnen:

$$pV = RT \quad \rightarrow \quad \rho = \frac{1}{v} = \frac{p}{RT} \approx \frac{p_{stat,0}}{RT} =$$

$$R_{Luft} = 287.1 \text{ J/kgK} \quad (\text{spez. Gaskonstante der Luft})$$

Im weiteren wird die Dichte  $\rho$  als konstant angenommen (inkompressibel), da die Geschwindigkeiten und die Temperaturen kaum veränderlich sind.

### Berechnung der Reynoldszahl $Re$ an der Stelle 0 (Sonde)

$$Re = \frac{D \cdot c}{\nu}$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

$$p_t = p_{stat} + \rho \frac{c^2}{2}$$

Re =

$\nu$  =

$\rightarrow c$  =

(  $\eta$  = dynamische Zähigkeit  $\eta_{Luft} = 17.98 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$  (bei 20°C) [Ns/m<sup>2</sup>]



$D$	charakteristische Länge (hier Rohrdurchmesser)	[m]
$c$	Geschwindigkeit	[m/s]
$\nu$	kinematische Zähigkeit	[m <sup>2</sup> /s]
$\eta$	dynamische Zähigkeit $\eta_{Luft} = 17.98 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$ (bei 20°C)	[Ns/m <sup>2</sup> ]

**Berechnung des Massenstromes**

$$\dot{V} = \alpha \varepsilon A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad \dot{m} = \dot{V} \rho$$

Die Kontraktionszahl  $\alpha$  und die Expansionszahl  $\varepsilon$  ist aus Tabelle 1 und dem Diagramm zu entnehmen.  $\rightarrow \kappa_{Luft} = 1.4$

$$m = \frac{A_0}{A_1} = \frac{(p_1 - p_2)}{\kappa \cdot p_1} =$$

$$\dot{V} =$$

$$\dot{m} =$$


---

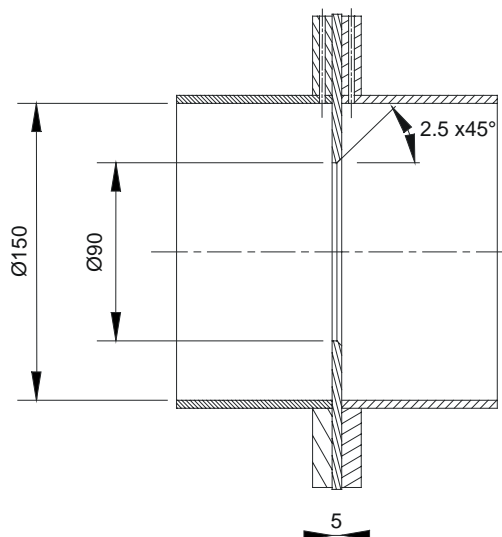
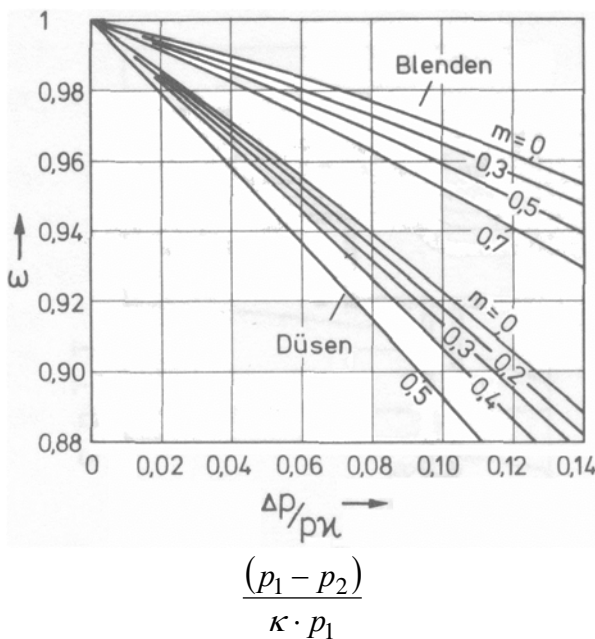




Tabelle 1. Durchflusszahlen für Normblenden in glatten Röhren gültig für Rohrdurchmesser  $D$  von 50 bis 1000 mm

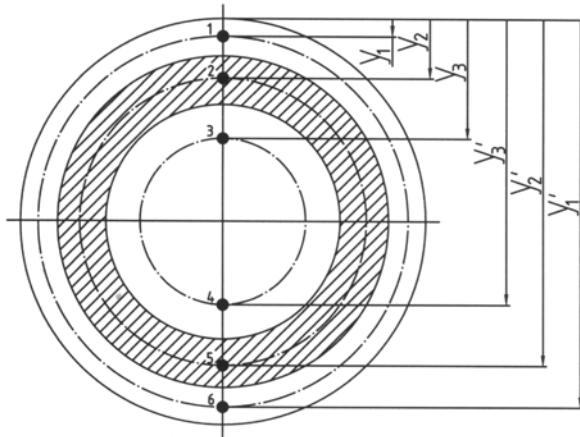
Zwischen den angegebenen Werten von  $m^2$  (nicht von  $m$ ) kann linear interpoliert werden

Re		$5 \cdot 10^3$	$10^4$	$2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$
$m$	$m^2$	$\alpha_0$							
0.0500	0.0025	0.6024	0.6005	0.5993	0.5989	0.5985	0.5981	0.5978	0.5977
0.0548	0.003	0.6032	0.6011	0.5998	0.5993	0.5988	0.5985	0.5981	0.5980
0.0632	0.004	0.6045	0.6022	0.6007	0.6001	0.5995	0.5991	0.5986	0.5986
0.0775	0.006	0.6058	0.6031	0.6015	0.6008	0.6002	0.5997	0.5992	0.5991
0.1000	0.01	0.6110	0.6073	0.6050	0.6039	0.6031	0.6025	0.6018	0.6016
0.1414	0.02	0.6194	0.6142	0.6108	0.6094	0.6081	0.6073	0.6062	0.6061
0.1732	0.03	0.6268	0.6203	0.6161	0.6143	0.6129	0.6117	0.6105	0.6103
0.2000	0.04	0.6335	0.6280	0.6212	0.6190	0.6173	0.6160	0.6146	0.6144
0.2236	0.05	0.6399	0.6315	0.6260	0.6236	0.6217	0.6202	0.6186	0.6185
0.2449	0.06		0.6370	0.6308	0.6281	0.6260	0.6245	0.6226	0.6223
0.2646	0.07		0.6422	0.6355	0.6327	0.6302	0.6284	0.6266	0.6262
0.2828	0.08		0.6474	0.6403	0.6371	0.6343	0.6324	0.6303	0.6300
0.3000	0.09		0.6526	0.6450	0.6415	0.6385	0.6362	0.6341	0.6338
0.3162	0.1		0.6577	0.6497	0.6459	0.6425	0.6401	0.6378	0.6375
0.3317	0.11		0.6630	0.6542	0.6500	0.6465	0.6439	0.6515	0.6412
0.3464	0.12		0.6682	0.6588	0.6544	0.6507	0.6478	0.6562	0.6449
0.3606	0.13		0.6734	0.6633	0.6587	0.6547	0.6516	0.6489	0.6486
0.3742	0.14		0.6786	0.6679	0.6629	0.6687	0.6555	0.6626	0.6522
0.3873	0.15		0.6839	0.6724	0.6672	0.6627	0.6594	0.6563	0.6559
0.4000	0.16		0.6890	0.6789	0.6716	0.6667	0.6633	0.6600	0.6596
0.4123	0.17		0.6943	0.6815	0.6759	0.6708	0.6671	0.6638	0.6633
0.4243	0.18		0.6995	0.6861	0.6802	0.6749	0.6711	0.6676	0.6670
0.4359	0.19		0.7047	0.6908	0.6846	0.6791	0.6751	0.6713	0.6708
0.4472	0.2		0.7099	0.6954	0.6890	0.6832	0.6791	0.6761	0.6746
0.4583	0.21		0.7153	0.7000	0.6934	0.6847	0.6830	0.6789	0.6784
0.4690	0.22		0.7206	0.7047	0.6979	0.6971	0.6871	0.6828	0.6823
0.4796	0.23		0.7259	0.7094	0.7024	0.6960	0.6911	0.6867	0.6861
0.4899	0.24		0.7312	0.7142	0.7069	0.7003	0.6952	0.6906	0.6899
0.5000	0.25		0.7356	0.7189	0.7114	0.7046	0.6994	0.6946	0.6933
0.5099	0.26		0.7419	0.7237	0.7160	0.7090	0.7035	0.6984	0.6977
0.5196	0.27		0.7472	0.7286	0.7207	0.7136	0.7078	0.7025	0.7017
0.5292	0.28		0.7526	0.7336	0.7255	0.7180	0.7121	0.7065	0.7057
0.5385	0.29		0.7580	0.7385	0.7301	0.7225	0.7163	0.7106	0.7096
0.5477	0.3		0.7635	0.7436	0.7349	0.7269	0.7206	0.7146	0.7136
0.5568	0.31		0.7690	0.7487	0.7398	0.7317	0.7250	0.7187	0.7177
0.5657	0.32		0.7745	0.7538	0.7446	0.7363	0.7294	0.7228	0.7218
0.5745	0.33		0.7802	0.7591	0.7495	0.7410	0.7339	0.7269	0.7259
0.5831	0.34		0.7859	0.7646	0.7547	0.7459	0.7385	0.7312	0.7301
0.5916	0.35		0.7917	0.7699	0.7597	0.7508	0.7432	0.7365	0.7343
0.6000	0.36		0.7976	0.7754	0.7648	0.7554	0.7476	0.7396	0.7384
0.6083	0.37			0.7809	0.7699	0.7605	0.7523	0.7439	0.7426
0.6164	0.38			0.7866	0.7752	0.7656	0.7571	0.7483	0.7470
0.6245	0.39			0.7924	0.7805	0.7706	0.7619	0.7527	0.7513
0.6325	0.4			0.7986	0.7864	0.7763	0.7673	0.7576	0.7561
0.6403	0.41			0.8046	0.7924	0.7819	0.7726	0.7624	0.7609

## Messung des Volumenstroms mittels Netzmessung

### Werte vom Prüfstand

Berechnung der Wandabstände der Meßpunkte für die Sondeneinstellung  $y_i$  bzw.  $y'_i$ :



Motorleistung Stufe :

Lufttemperatur vor Versuch:

Lufttemperatur nach Versuch:

$$\frac{y_i}{D} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2i-1}{2n}} \right]$$

$$\frac{y'_i}{D} = 1 - \frac{y_i}{D}$$

$$\Rightarrow y_i =$$

$$\Rightarrow y'_i =$$

Umrechnung auf SI-Einheiten, Berücksichtigung des Umgebungsdrucks und Ermittlung der Geschwindigkeiten:

MP Nr.	$y_i$ [mm]	$y'_i$ [mm]	$p_t$ [mmWS]	$p_{stat}$ [mmWS]
1		--		
2		--		
3		--		
4	--			
5	--			
6	--			

$$1 \text{ mmWS} = 0.0981 \text{ mbar} = 9.81 \text{ Pa}$$

$$p_{abs} = p_{rel} + p_{Umgebung} \quad p_{Umgebung} = \quad \text{mmHg (Torr)} = \quad \text{Pa}$$

$$p_t = p_{stat} + \rho \frac{c^2}{2} \quad \rightarrow c =$$



MP Nr.	$p_i$ [Pa]	$p_{stat}$ [Pa]	$c$ [m/s]
1			
2			
3			
4			
5			
6			

**Berechnung der mittleren Geschwindigkeit**

$$c_m = \bar{c} - (\bar{c}_2 - \bar{c}_1) \frac{k}{n}$$

$$\bar{c} = \frac{1}{z} \sum_1^z c_i$$

$$\bar{c}_1 = \frac{c_1 + c_6}{2}$$

$$\bar{c}_2 = \frac{c_2 + c_5}{2}$$

→  $k/n = 0.08404$  (Randzonen- Korrekturfaktor für Kreisquerschnitt und  $n = 3$ )

$$c_m =$$

$$\bar{c} =$$

$$\bar{c}_1 =$$

$$\bar{c}_2 =$$

**Berechnung des Volumenstromes**

$$\dot{V} = c_m A$$

$$A =$$

$$\dot{V} =$$

**Berechnung des „Normvolumenstromes“**

„Normvolumenstrom“ bei Normwerten:

( $t = 0^\circ\text{C}$  bzw.  $T_N = 273 \text{ K}$  und  $p_N = 1013 \text{ mbar}$ )

⇒  $T_N/p_N = 0.2695$ :

$$\dot{V}_N = \dot{V} \cdot 0.2695 \frac{p_1 [\text{mbar}]}{T_1 [\text{K}]}$$

$$p_1 = \frac{1}{z} \sum_1^z p_i$$

$$T_1 \approx T_t$$

mit  $p_1 =$

$$\dot{V}_N =$$


---



## Zustand der Luft (trocken und feucht)

Normungen, Vorschriften, Verordnungen

### 1) Normvolumen:

**DIN 1343**, Ausgabe:1990-01

Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe und Werte

"Normzustand mit der Normtemperatur  $T_n = 273,15 \text{ K}$  ( $t_n = 0 \text{ °C}$ )

und Normdruck  $p_n = 1013,25 \text{ mbar} = 1 \text{ atm} (= 101,325 \text{ kPa})$

→ "Normkubikmeter:  $\text{m}^3_n$ , alt  $\text{Nm}^3$ .

Gilt für alle (realen) Gase, für Luft daher keine Feuchteangaben. "Trockene Luft"

### 2) Norm - Atmosphäre:

**DIN ISO 2533**, Ausgabe:1979-12 (deutsch) Normatmosphäre

ISO 2533, Ausgabe:1975-05 (englisch) Normatmosphäre

ISO 2533 ADD 1, Ausgabe:1985-02 (englisch/französisch/russisch)

Normatmosphäre; Ergänzung 1: Hypsometrische Tabellen

ISO 2533 ADD 2, Ausgabe:1997-11 (""/")

Normatmosphäre; Ergänzung 2: Erweiterung bis -5000 m und Normatmosphäre als Funktion der Höhe in Fuß

Temperatur  $t = 15 \text{ °C}$

Druck  $p = 1013 \text{ mbar}$

Dabei Dichte der "Trockenen Luft" bei  $0 \text{ °C}$  und  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ :  $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$

### 3) International Standard Atmosphere (ISA):

ICAO 1964 (for dry air) Mean sea level pressure= 1013,25 hPa// temp= 15 degC

ISA to be used for FAI matters is given in ICAO Document 7488 tables 3 and 4,  $15 \text{ °C}$  and 760 mm mercury (1013,25 mb/hPa)

and a constant temp lapse rate of  $6,5 \text{ °C}$  per 1000 m ( $1,98 \text{ °C}/3,56 \text{ °F}$  per 1000 ft)

(up to 11.000 m,  $-56,5 \text{ °C}$ ).

### 4) International Standard Atmosphere (ISA): Höhenformeln

$T = 288,15 - 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ H}$

$p = 1,013 \cdot 10^5 (1 - 2,2571 \cdot 10^{-5} \text{ H})^{5,259}$

$\rho = 1,226 (1 - 2,2571 \cdot 10^{-5} \text{ H})^{4,259}$  compare to  $\rho = 1,226 \exp \{-\text{H}/9149\}$ ; H in km

### 5) Norm-Bezugsbedingungen festgelegt in DIN 4341-1, Ausgabe:1979-08

Gasturbinen; Abnahmeregelungen für Gasturbinen, Grundlagen wie folgt:

Totaldruck 1,013 bar

Totaltemperatur  $15 \text{ °C}$

relative Feuchte 60%

### 6) Zur Druckmessung:

a) Luftdruck in Institutsumgebung (Barometrische Höhe): **365 m: - 43 mbar / - 32,5 Torr**

(Meteorologischer) Luftdruck = Barometerstand + 43 mbar

b) Umrechnungen:

**1013 mbar = 760 mmHg = 1 atm → 1 mbar = 0,75 Torr (mmHg) → ZW Torr/0.75 = ZW mbar**

**1 cm WS = 0,981 mbar = 98,1 Pa → 1 cm WS  $\cong$  1 mbar  $\cong$  100 Pa (1 hPa)**





## Fehlerrechnung

Fehler werden i.A. angegeben als:

absolute Fehler	$x \pm \Delta x$	z..B.: (12±1) mm
relative Fehler	$x \pm \frac{\Delta x}{x} \cdot 100 \text{ [%]}$	z.B. 12 mm ± 8%

Fehler werden in zwei Klassen eingeteilt:

Systematische Fehler die während der Messung konstant bleiben

Nullpunktsfehler; Verwendung von Plastik-, Holzlineal, Millimeterpapier als "absolute" Skalen.

Zufällige Fehler (statistische Fehler) ändern sich während der Messung zufällig - diesem Fehler können wir eine statistische Verteilung (z.B. Gauß- oder Normalverteilung) zugrundelegen.

Ablesefehler (z.B. Parallaxenfehler bei Zeigerinstrumenten);

Fehlerabschätzung bei zufälligen Fehlern:

Aufnahme einer Meßreihe mit  $x_n$  Werten.

Arithmetischer Mittelwert (Bestwert)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Scheinbarer Fehler

$$x_i - \bar{x}$$

Standardfehler einer Einzelmessung

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Standardfehler des Mittelwertes von Messungen

$$\Delta \bar{x} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

sodaß als Ergebnis der Messung angegeben werden kann:

$$\bar{x} \pm \Delta \bar{x} \quad \text{bzw.} \quad \bar{x} \pm \frac{\Delta \bar{x}}{\bar{x}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Beispiel:

$x_i$	$(x_i - \bar{x})$
	+0,011
1,31	-0,019
1,29	+0,001
1,28	+0,011
1,30	-0,009
1,31	-0,019
1,27	+0,021
$\Sigma=9,04$	$\Sigma(x_i - \bar{x})^2=0,001487$

Es ist somit:

$$\bar{x} = \frac{9,04}{7} = 1,291428$$

$$\Delta x = \sqrt{\frac{1487 \cdot 10^{-6}}{6}} \approx 16 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta \bar{x} = \sqrt{\frac{1487 \cdot 10^{-6}}{42}} \approx 6 \cdot 10^{-3}$$

Das Ergebnis lautet somit: Meßwert = 1,291±0,006 Einheiten

Es hat keinen Sinn mehr als 3 Dezimalstellen anzugeben.

Für den Fall  $n < 4$  sollen obige Formeln für den Fehler nicht verwendet werden.

Abschätzung der Fehler anhand des Meßanzeige oder "mittlerer Einzelfehler":

$$\Delta \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|$$