



Fachlabor Wärme- und Strömungstechnik  
**Messung einer turbulenten Rohrströmung**

**Gruppe:** .....

Name	Vorname	Matrikelnummer

**Tag des Versuchs:** .....

**Korrekturhinweis:** .....

.....  
.....  
.....  
.....

**Endtestat:** .....

# 1 Versuchsaufbau und Messeinrichtung

Mit Hilfe eines stufenlos regelbaren Radialgebläses wird Umgebungsluft durch ein 6 m langes Rohr mit einem Innendurchmesser von 76 mm gesaugt (siehe Bild 4.1). Das Rohr ist hydraulisch glatt.

Am Rohreinlauf kann wahlweise eine Einlaufdüse mit einem Durchmesser im Düsenaustritt von 50 mm oder 76 mm montiert werden. Bei Montage der kleineren Düse ergibt sich am Düsenaustritt eine plötzliche Erweiterung zum vollen Rohrquerschnitt. Ein solcher Querschnittssprung in einem Rohr wird Carnotscher Stoßdiffusor (Bild 4.2) genannt.

Zur Aufnahme des statischen Druckes  $p(x)$  sind längs des Rohres einige Wandanbohrungen angebracht. An der Einlaufdüse kann eine axial verfahrbare Druckmesssonde montiert werden, mit der der statische Druck in der Düse gemessen werden kann.

Das Geschwindigkeitsprofil der Rohrströmung wird mit Hilfe eines senkrecht zur Rohrachse, d. h. in radialer Richtung, verfahrbaren Pitot-Rohrs und einer Wandanbohrung gemessen. Das Pitot-Rohr erfasst den Gesamtdruck in Abhängigkeit des Rohrradius  $p_{ges}(r)$ , die Wandanbohrung den statischen Druck  $p$ . Angeschlossen an ein Differenzdruckmanometer resultiert aus den beiden Drücken der dynamische Druck  $p_{dyn}(r)$ , aus dem die Geschwindigkeit berechnet werden kann.

Zur Druckmessung werden Flüssigkeitsmanometer (Betz- und/oder Schrägrohr-Manometer) und elektronische Druckaufnehmer (kapazitiv und/oder piezoresistiv) verwendet. Zur Messung von Umgebungsluftdruck und -temperatur stehen ein Quecksilberbarometer bzw. -thermometer zur Verfügung.

## 2 Messaufgabe

### 2.1 Turbulente Rohrströmung mit bündiger Einlaufdüse

Die Messungen in diesem Aufgabenteil sind mit der bündig in die Rohrleitung übergehenden Düse ( $d = 76 \text{ mm}$ ) für drei Gebläsedrehzahlen  $n_1 = 1300 \text{ min}^{-1}$ ,  $n_2 = 1800 \text{ min}^{-1}$  und  $n_3 = 2300 \text{ min}^{-1}$  auszuführen. Der Drosselschieber am Auslassstutzen des Radialgebläses ist bei allen Versuchen voll geöffnet.

- a) Die Geschwindigkeitsprofile in der Rohrleitung sind zu messen (verfahrbares Pitot-Rohr) und die Messwerte in die entsprechende Tabelle einzutragen. Aufgrund der rotationssymmetrischen Form des Geschwindigkeitsprofils einer Rohrströmung genügt es Messwerte entlang eines Radialstrahls von der Rohrachse bis zu Rohrwand aufzunehmen. Bei der Drehzahl  $n_2$  ist zusätzlich die Symmetrie des Geschwindigkeitsprofils zu überprüfen, d.h., der ganze Rohrquerschnitt wird auf zwei Radialstrahlen vermessen.
- b) Der Verlauf des statischen Drucks  $p(x)$  ist längs der Rohrachse aufzunehmen.
- c) Zur Bestimmung der Luftdichte  $\rho_L$  sind die Werte für die Lufttemperatur  $T_L$  (entspricht Raumtemperatur) und den Umgebungsluftdruck  $p_{atm}$  abzulesen.

## 2.2 Druckrückgewinn bei plötzlicher Rohrerweiterung (Stoßdiffusor)

Zunächst wird die Einlaufdüse mit dem Durchmesser  $50\text{ mm}$  eingebaut und die axial verfahrbare Druckmesssonde samt Halterung montiert. Das Pitot-Rohr muss auf die Rohrachse, d. h. an die Position  $r = 0\text{ mm}$  verfahren werden.

Dann wird die Gebläsedrehzahl so hoch gedreht, bis der dynamische Druck auf der Rohrachse so groß ist wie bei der Drehzahl  $n_2$  aus dem vorherigen Versuchsteil. Dadurch wird erreicht, dass der gleiche Volumenstrom  $\dot{V}$  wie bei  $n_2$  durch das Rohr gesaugt wird. Achtung: Aufgrund des zusätzlichen Druckverlustes, der mit dem Stoßdiffusor auftritt, wird die hier einzustellende Drehzahl größer sein als  $n_2$ .

- d) Der statische Druck in der Düse und im Rohr ist stromab des Einlasses der Düse zu messen. Dazu müssen sowohl die axial verfahrbare Druckmesssonde als auch Wandaufbohrungen im Rohr verwendet werden. Die mit der Sonde anzufahrenden Messpunkte können der Tabelle, in der auch die Messwerte eingetragen werden sollen, entnommen werden.

## 3 Auswertung

In den folgenden Teilaufgaben wird erläutert, wie sie ihre Messergebnisse auswerten sollen bzw. welche charakteristischen Größen einer turbulenten Rohrströmung ermittelt werden sollen.

Der abzugebende Gruppenbericht besteht nach einer kurzen Beschreibung von Versuchsaufbau und -durchführung aus der schriftlichen Bearbeitung der Teilaufgaben in 3.1 und 3.2. Schreiben sie stets die verwendeten mathematischen Beziehungen auf. Alle Ergebnisse sollen im Hinblick auf ihre Gültigkeit diskutiert werden. Vermutete Abweichungen zwischen Theorie und Experiment sind zu diskutieren.

Es empfiehlt sich, schon beim Versuch einen Rechner dabeizuhaben, um nach den Messungen direkt mit der Auswertung starten zu können. Ein Taschenrechner sollte unbedingt mitgebracht werden.

### 3.1 Auswertung zu Messaufgabe 2.1

- a) Berechnen sie die Luftdichte, die zur Zeit der Messung vorgelegen hat.  
b) Die Geschwindigkeitsprofile sind in einem Diagramm graphisch darzustellen in der Form

$$\frac{u}{u_{max}} = f\left(\frac{r}{R}\right)$$

- c) Zur Überprüfung der Symmetrie des Geschwindigkeitsprofils bei der Gebläsedrehzahl  $n_2$  stellen sie  $u(r)$  für beide Radialstrahlen in einem Diagramm dar ( $u(r)$  auf die Abszisse,  $r$  auf die Ordinate). Treten hier merkliche Abweichungen auf, nennen sie die möglichen Ursachen dafür.

- d) Aus den Geschwindigkeitsprofilen sind der Volumenstrom  $\dot{V}$  und die mittlere Durchflussgeschwindigkeit  $u_m$  zu berechnen. Die Berechnung des Volumenstroms erfolgt nach dem Prinzip der Netzmessung. Zugrunde liegt die Gleichung:

$$\dot{V} = \int u \, dA = 2\pi \int_{r=0}^{r=R} u \, r \, dr$$

Zur Lösung des Integrals müssen sie ein numerisches Integrationsverfahren ihrer Wahl verwenden.

Das Verhältnis  $u_m/u_{max}$  ist in Abhängigkeit der Reynoldszahl in einem Diagramm darzustellen.

- e) Der Druckverlauf des statischen Drucks  $p(x)$  ist für alle drei Drehzahlen zusammen in einem Diagramm darzustellen. Kennzeichnen sie darin den Bereich der ausgebildeten Rohrströmung.
- f) Die Wandschubspannung  $\tau_W$  ist für die ausgebildete Rohrströmung anhand des Druckverlaufs  $p(x)$  zu ermitteln und in Abhängigkeit der ausgebildeten Rohrströmung darzustellen.
- g) Es ist zu überprüfen, ob die experimentell ermittelten Widerstandszahlen  $\lambda$  mit dem theoretischen Verlauf für eine turbulente Strömung in hydraulisch glatten Rohren nach Blasius übereinstimmen.
- h) Zur Überprüfung, ob die gemessene Geschwindigkeitsverteilung durch das logarithmische Wandgesetz von Prandtl beschrieben wird, ist eine graphische Darstellung in folgender Form anzufertigen:

$$\frac{u}{u_\tau} = f(y^+)$$

Nach Prandtl gilt

$$u/u_\tau = y^+ \quad \text{für } y^+ \leq 5 \quad \text{viskose (laminare) Unterschicht}$$

$$u/u_\tau = 5 \ln(y^+) - 3,05 \quad \text{für } 5 < y^+ \leq 30 \quad \text{Übergangsschicht}$$

$$u/u_\tau = 2,5 \ln(y^+) + 5,5 \quad \text{für } y^+ > 30 \quad \text{turbulente wandnahe Zone}$$

mit der Schubspannungsgeschwindigkeit

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_W}{\rho}}$$

und der dimensionslosen Wandeinheit

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$$

Dabei ist  $y$  der reale Wandabstand und  $\nu$  die kinematische Viskosität.

Plotten sie den theoretischen Kurvenverlauf  $u/u_\tau = f(y^+)$  in ein Diagramm (logarithmische Ordinate verwenden) und fügen sie zum Vergleich ihre Messpunkte in das Diagramm ein (für jede Ventilator Drehzahl ein Diagramm).  
Reicht die Messung bis in die viskose Unterschicht hinein?

### 3.2 Auswertung zur Messaufgabe 2.2

- a) Bestimmen sie rechnerisch den statischen Drucks  $p(x)$  durch die Düse und den Stoßdiffusor für den theoretischen Fall einer vollkommen reibungsfreien Strömung, die der Wandkontur ohne Ablösung folgt. Dazu benötigen sie die Bernoulli- und die Kontinuitätsgleichung.
- b) Stellen Sie den theoretischen Druckverlauf aus Teilaufgabe a) dem gemessenen Druckverlauf  $p(x)$  in einem Diagramm gegenüber.
- c) Wie groß ist der gemessene Druckrückgewinn über den Stoßdiffusor? Vergleichen Sie das Messergebnis mit dem theoretischen Ergebnis, dass sich bei Anwendung des Impulssatzes auf den Stoßdiffusor ergeben würde?

# 4 Skizzen

## Versuchsaufbau zur Untersuchung von Rohrströmungen

Fabrikat: *Plint & Partners LTD (England)*

Typ: *HOGRA TE 50*

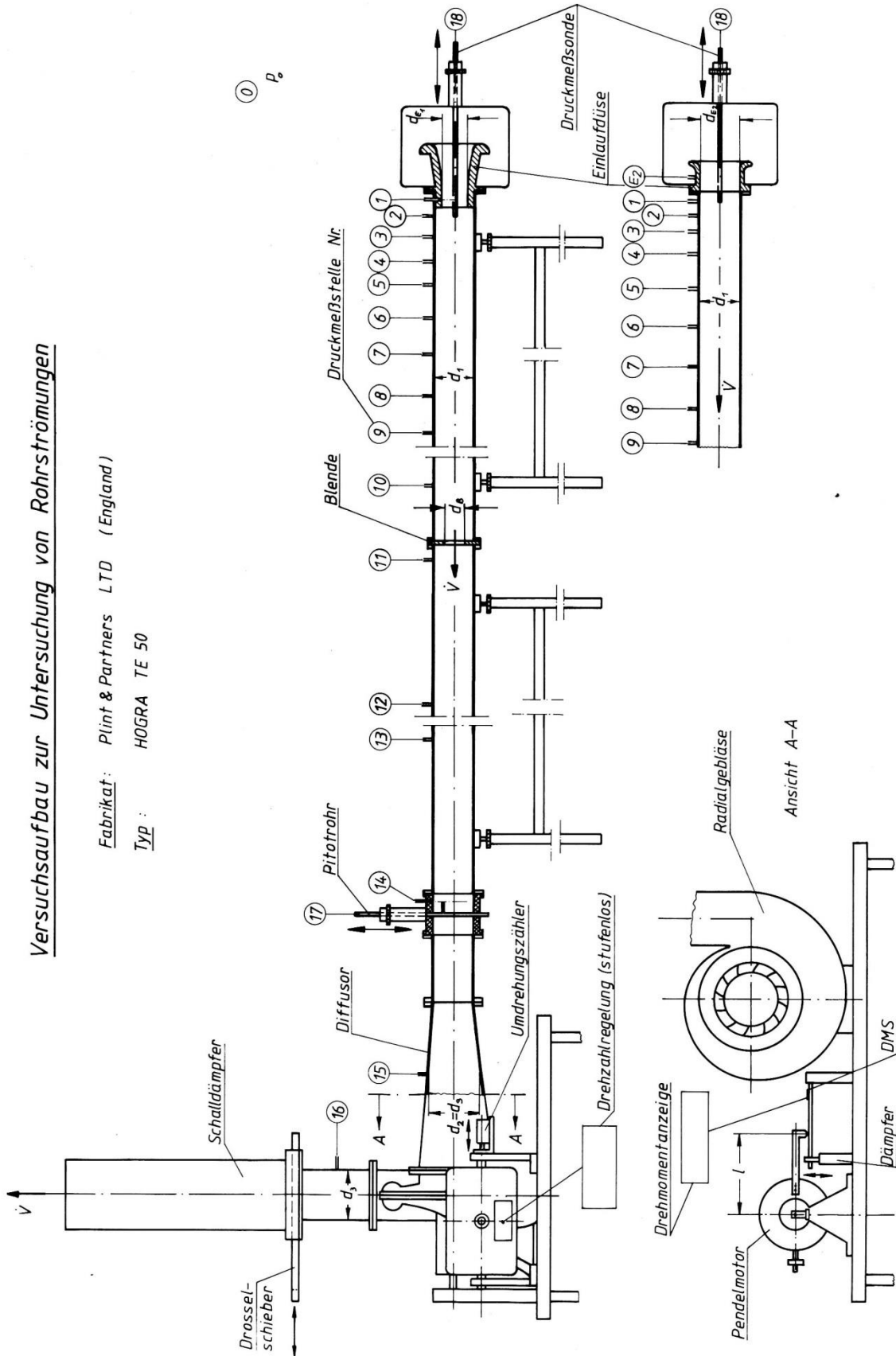
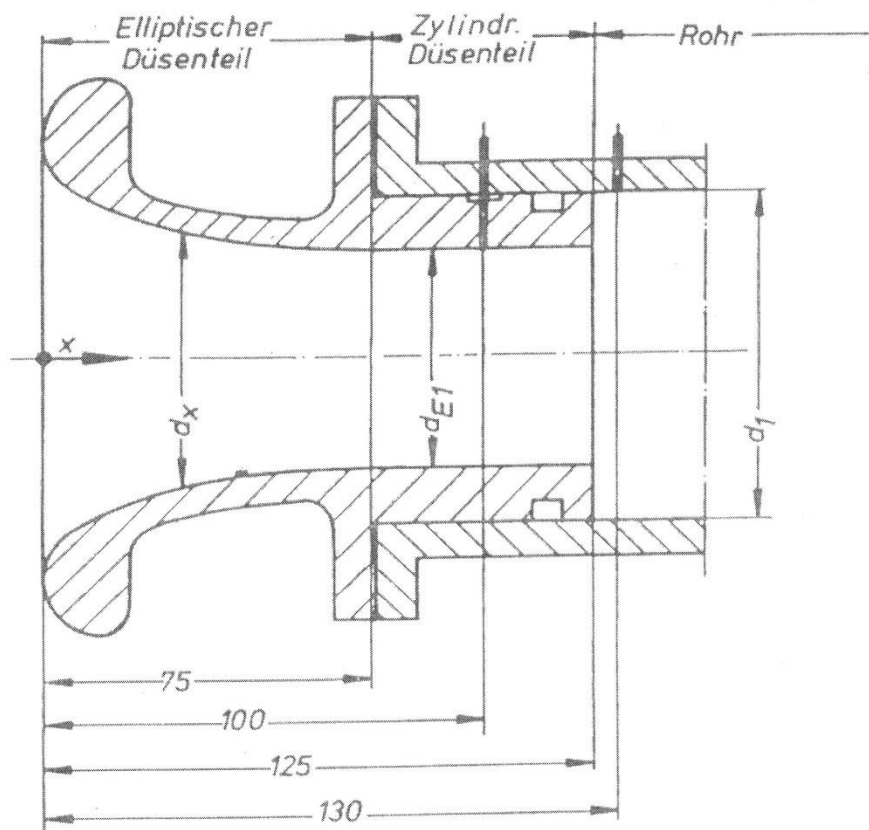


Bild 4.1 Versuchsstand



$$0 \leq x \leq 75: d_x = 100 - 50 \sqrt{1 - \left(\frac{75-x}{75}\right)^2} \quad \text{in mm}$$

$$75 \leq x \leq 125: d_{E1} = 50 \text{ mm}$$

$$125 \leq x: d_f = 76 \text{ mm}$$

**Bild 4.2** Kontur kleine Düse mit Stoßdiffusor

## 5 Messprotokolle

### Ventilator Drehzahlen:

$$n_1 = \quad \quad \quad \text{min}^{-1}$$

$$n_2 = \quad \quad \quad \text{min}^{-1}$$

$$n_3 = \quad \quad \quad \text{min}^{-1}$$

### Berechnung Luftdichte:

Raumtemperatur  $T_L = \quad \quad \quad \text{°C}$

Abgelesener oberer Barometerstand:  $b_t = \quad \quad \quad \text{mbar}$

Korrekturwert Temperatureinfluss  $K_T = \quad \quad \quad \text{mbar}$

Korrekturwert Kapillardepression  $K_K = \quad \quad \quad \text{mbar}$

Korrekturwert geographische Breite  $K_{g\varphi} = \quad \quad \quad \text{mbar}$

Korrekturwert Höhe über Meeresspiegel  $K_{gH} = \quad \quad \quad \text{mbar}$

Korrigierter Luftdruck  $p_{atm} = b_t + K_T + K_K + K_{g\varphi} + K_{gH} = \quad \quad \quad \text{mbar}$

Spezifische Gaskonstante von Luft  $R_L = 287,2 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$

Berechnete Luftdichte

$$\rho = \frac{p_{atm}}{R_L T_L} = \quad \quad \quad \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

### Interpolation kinematische Viskosität:

Zur Berechnung der Reynoldszahl wird die kinematische Viskosität  $\nu$  von Luft bei Normaldruck in Abhängig der Temperatur aus der folgenden Tabelle entnommen. Zwischenwerte müssen interpoliert werden.

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



$$v_1 = \frac{m^2}{s}, \quad v_2 = \frac{m^2}{s}$$

$$T_1 = \text{°C}, \quad T_2 = \text{°C}$$

$$v = v_1 + \frac{v_2 - v_1}{T_2 - T_1} T_L = \frac{m^2}{s}$$

Messung Geschwindigkeitsprofile:

Rohrdurchmesser: 76 mm

Durchmesser Pitot-Rohr: 1 mm

		n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	n <sub>2</sub> Prüfung	n <sub>3</sub>
y (mm)	r (mm)	Δp <sub>dyn</sub> (mmWS)	Δp <sub>dyn</sub> (mmWS)	Δp <sub>dyn</sub> (mmWS)	Δp <sub>dyn</sub> (mmWS)
38,0	0				
33	5				
28	10				
23	15				
18	20				
13	25				
8	30				
7	31				
6	32				
5	33				
4,5	33,5				
4	34				
3,5	34,5				
3	35				
2,5	35,5				
2	36				
1,5	36,5				
1	37				
0,5	37,5				
0	38				

Messung statischer Druck entlang Rohr:

Da zur Druckmessung Differenzdruckmanometer/-Druckaufnehmer verwendet werden, wird der statische Druck nicht als Absolutdruck, sondern als Unterdruck gegenüber dem Umgebungsdruck gemessen.

		$n_1$	$n_2$	$n_3$
Messtelle	Abstand zur nächsten Messtelle	p	p	p
Nr.	[mm]	[ ]	[ ]	[ ]
1	30			
2	45			
3	100			
4	100			
5	200			
6	200			
7	200			
8	200			
9	1000			
10	995			
11	1000			
12	1000			
13	-			

Messung statischer Druck in kleiner Düse, Stoßdiffusor und entlang Rohr:

Da zur Druckmessung Differenzdruckmanometer/-Druckaufnehmer verwendet werden, wird der statische Druck nicht als Absolutdruck, sondern als Unterdruck gegenüber dem Umgebungsdruck gemessen.

Bemerkung: DMS-V: Druckmessspindel vorne

DMB Nr.: Druckmessbohrung Nr.

Messtelle	Abstand von Einlass Düse	p	Bemerkung
Nr.	[mm]	[ ]	
1	0		DMS-V
2	5		DMS-V
3	10		DMS-V
4	20		DMS-V
5	30		DMS-V
6	40		DMS-V
7	50		DMS-V
8	60		DMS-V
9	70		DMS-V
10	80		DMS-V
11	90		DMS-V
12	100		DMS-V
13	110		DMS-V
14	115		DMS-V
15	120		DMS-V
16	125		DMS-V
17	130		DMS-V
18	175		DMB 3
19	275		DMB 4
20	375		DMB 5
21	575		DMB 6
22	775		DMB 7
23	975		DMB 8
24	1175		DMB 9
25	2175		DMB 10
26	3170		DMB 11
27	4170		DMB 12
28	5170		DMB 13

## 6 Literatur

- [1] L. Böswirth, M. Plint Technische Strömungslehre,  
Hermann Schroedel Verlag KG,  
Hannover 1975
  
- [2] J. Zierep, K. Bühler Grundzüge der Strömungslehre, 7. Verb. Auflage  
B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH  
Wiesbaden 2008
  
- [3] H. Foysi Vorlesungsskript Höhere Fluidodynamik  
Siegen, 2019
  
- [4] H. Foysi Vorlesungsskript Strömungsmechanik  
Siegen, 2019
  
- [5] H. Eckelmann Einführung in die Strömungsmeßtechnik  
B. G. Teubner Verlag  
Stuttgart, 1997