



Fachhochschule Stralsund

Fachbereich Maschinenbau

Laboratorium Strömungstechnik

Prof.Dr.-Ing. J.A.Szymczyk

Dipl.-Ing (FH) T.Panten

Versuch ST 3

"Strömungstechnische Messungen in kompressiblen Fluiden"

Inhalt:

1.Grundlagen	2
2.Versuchsaufbau	11
3.Versuchsdurchführung	12
4.Versuchsauswertung	13
4.1 Berechnung und Darstellung der Kenngrößen	13
4.2 Diskussion der Ergebnisse	13

1. Grundlagen

Im Gegensatz zu Flüssigkeiten sind Luft, Gase oder Dämpfe kompressibel. Hinsichtlich der Kompressibilität ihrer Strömungen muß die im Kap. 1.3.4 der "Theoretischen Grundlagen" definierte *Mach-Zahl* Ma herangezogen werden. Bei $Ma > 0,3$ ist die Strömung kompressibel. Dabei handelt es sich in Rohrleitungssystemen um eine Expansionsströmung, da der Druck infolge der Strömungsverluste durch Reibung abnimmt. Neben dem Druck ändern sich mit der Längenkoordinate l auch Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit. Im Gegensatz zur inkompressiblen Strömung von Flüssigkeiten ist der Druckverlust Δp_v längs der Rohrleitung nicht linear und die Strömungsgeschwindigkeit w nicht konstant. In *Abb. 1* sind inkompressible und kompressible Rohrströmung gegenübergestellt.

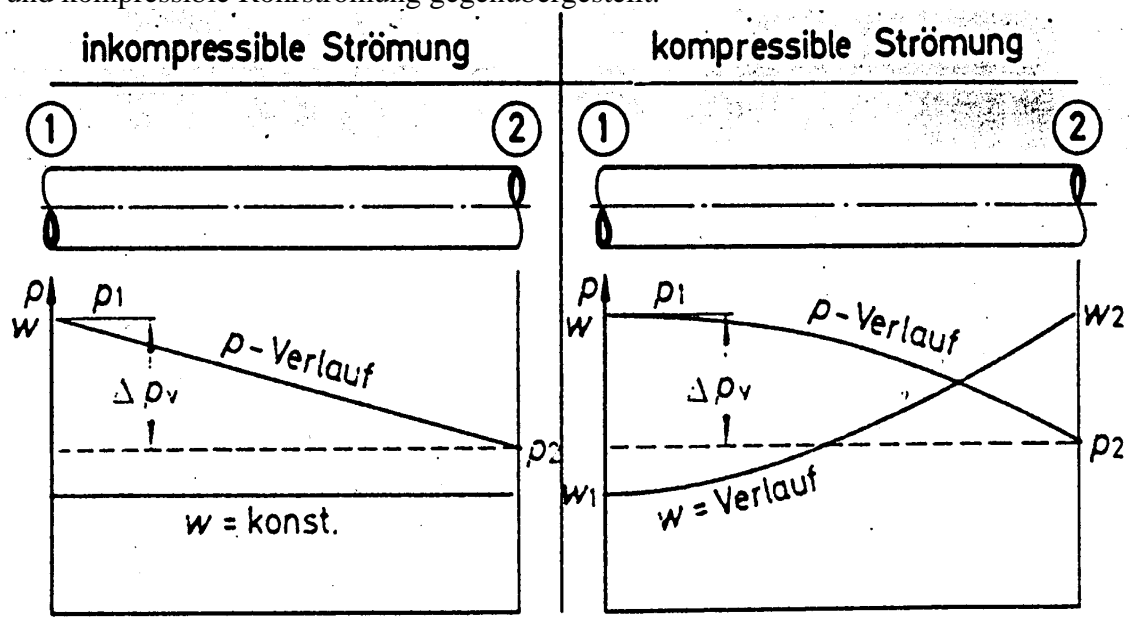


Abb.1 Gegenüberstellung von inkompressibler und kompressibler Rohrströmung

Bei der praktischen Ausführung von Rohrleitungen findet man zwei Varianten :

- a) unisolierte Rohrleitung (*Abb. 2*)

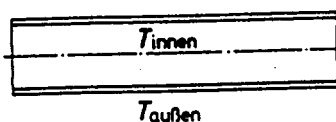


Abb.2 Unisolierte Rohrleitung

Es findet ein Wärmeaustausch durch die Rohrwand statt. Dabei gleicht sich die Temperatur des Strömungsmediums T_{innen} allmählich an die Außentemperatur $T_{\text{außen}}$ an. Die Strömung kann in guter Näherung als isotherm betrachtet werden. Eine derartige Strömung liegt z.B. in unterirdisch verlegten Ferngasleitungen vor.

b) wärmeisolierte Rohrleitung

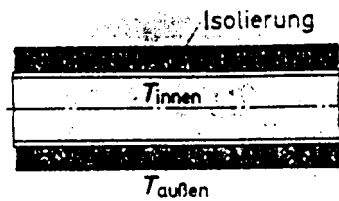


Abb. 3 Wärmeisolierte Rohrleitung

Die Isolierung der Rohrleitung verhindert fast völlig den Wärmeaustausch mit der Umgebung. Damit kann die Rohrströmung näherungsweise als adiabat betrachtet werden. Wärmeisolierte Rohrleitungen finden immer dort Anwendung, wo sich die Temperatur des strömenden Mediums T_{innen} nicht an die Außentemperatur $T_{\text{außen}}$ angleichen soll (z.B. in Heizungssystemen).

Die isotherme und die adiabatische Rohrströmung sind Grenzfälle, da bei realen Rohrströmungen immer ein Wärmeaustausch auftritt und auch die Temperatur nicht immer konstant bleibt. Bei kompressibler Rohrströmung in Rohren mit kreisförmigem Querschnitt wird stationäre Strömung vorausgesetzt. Den Ausgangspunkt bildet die Beziehung für den Druckverlust turbulenter inkompressibler Rohrströmung (siehe auch STL 2), die für ein Rohrelement mit der Länge dl (Abb.4), der Nennweite d und der Rohrreibungszahl λ folgende Form hat:

$$dp = -l \times \frac{\lambda}{2 \times d} \times w^2 \tag{1}$$

Das negative Vorzeichen auf der rechten Seite des Terms resultiert aus der Abnahme des Drucks mit zunehmender Rohrlänge.

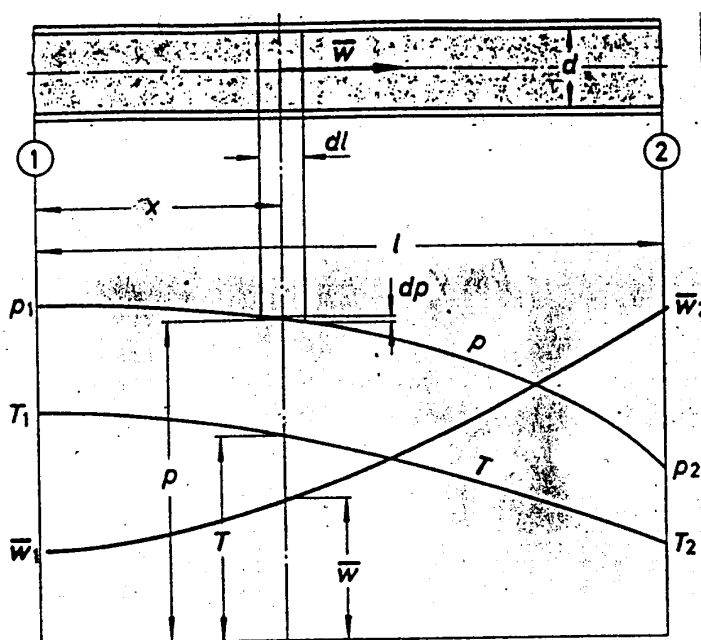


Abb. 4 Kompressible Rohrströmung

Die Dichte ρ lässt sich mit Hilfe der Zustandsgleichung idealer Gase durch Druck und Temperatur ausdrücken:

$$r = r_1 \times \frac{T_1}{T} \times \frac{p}{p_1} \quad (2)$$

Die Strömungsgeschwindigkeit w kann über die Kontinuitätsgleichung bei kompressiblen Strömungen (Gl.1.9) für konstanten Querschnitt wie folgt bestimmt werden:

$$w = w_1 \times \frac{T \times p_1}{T_1 \times p} \quad (3)$$

Setzt man Gl. 2 und Gl.3 in Gl.1 ein, so erhält man die Differentialgleichung für den Druckverlust längs der Rohrleitung:

$$dp = -l \times \frac{r_1 \times w_1^2}{2 \times d} \times \frac{T}{T_1} \times \frac{p_1}{p} \times dl \quad (4)$$

Die Integration von Gl.4 ist analytisch nicht möglich. Um den Druckverlust Δp_v näherungsweise zu bestimmen geht man von folgenden Vereinfachungen aus:

- Die Rohrreibungszahl λ ist konstant.
- Die Temperatur T wird durch eine mittlere Temperatur $T = \frac{(T_1 + T_2)}{2}$ ersetzt.
- Die Beschleunigungskräfte infolge der Geschwindigkeitszunahme werden vernachlässigt.

Damit lässt sich eine Integration durchführen und es ergibt sich:

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = l \times \frac{1}{d} \times \frac{T}{T_1} \times r_1 \times \frac{w_1^2}{2} \quad (5)$$

Für konstante Temperatur längs der Rohrleitung (isotherme Strömung) entfällt das Temperaturglied T/T_1 und es genügen zur Bestimmung des Druckverlustes Δp_v die Werte von ρ , w , v , Re , λ sowie die Rohrlänge l und die Nennweite d . Für die Bestimmung der Rohrreibungszahl können die bereits aus dem Versuch STL1 bekannten Rohrreibungsdiagramme verwendet werden. Dafür müssen die *Reynolds*-Zahl entsprechend Gl.1.23 und die relative Rauigkeit d/k berechnet werden. Die Problematik adiabater Strömung wird an dieser Stelle nicht näher betrachtet. Zur Erleichterung der Bestimmung des Druckverlustes gibt es in der Literatur spezielle Diagramme. In *Abb.5* ist ein derartiges Diagramm nach VDI 2087 dargestellt.

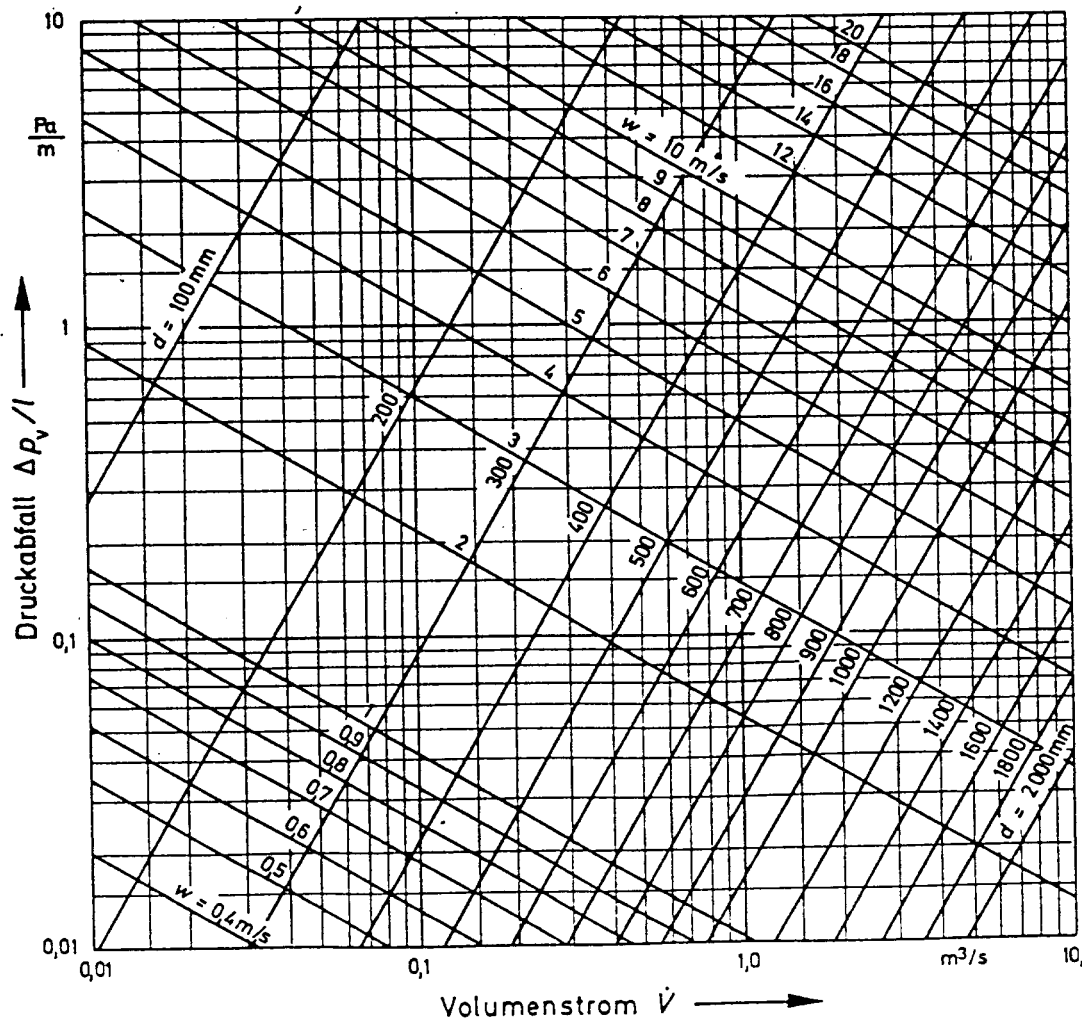


Abb.5 Druckabfall von Luftströmungen in Rohrleitungen mit kreisförmigem Querschnitt

Wie bei inkompressiblen Strömungen von Flüssigkeiten sind in Rohrleitungssysteme kompressibler Fluide neben geraden Rohrleitungsstrecken auch Rohrleitungselemente integriert. Diese verursachen auch einen zusätzlichen Druckverlust Δp_{vE} entsprechend der aus dem Versuch STL 1 bereits bekannter Beziehung:

$$\Delta p_{vE} = z \times r \times \frac{w^2}{2} \tag{6}$$

Für das Rohrleitungselement Drosselklappe sind die Widerstandsbeiwerte in Abb.6 zusammengestellt.

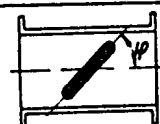
Armatur	Bild	ζ-Werte abhängig von der Stellung des Stellgliedes							
		Winkel φ	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°
Drosselklappe		ζ-Wert	0,52	1,54	3,91	10,8	32,6	118	251

Abb.6 Widerstandsbeiwerte einer Drosselklappe

Der Widerstandsbeiwert eines Umlenkrohres (im Versuch bestehend aus zwei 90°-Segmentkrümmern) ist $\zeta = 1$. Strömungstechnische Messungen in Rohrleitungssystemen mit Wirkdruckgebern, die am Beispiel einer Luftströmung auch Gegenstand des vorliegenden Versuches sind, können als eine mögliche Anwendung der *Kontinuitäts-* und *Bernoulli-*Gleichung betrachtet werden. Wirkdruckgeber werden zur Messung des Volumenstroms in geschlossenen und vollständig gefüllten Rohrleitungen angewendet. Das Meßverfahren beruht auf der Veränderung der Strömungsverhältnisse beim Durchströmen einer Drosselstelle. Der Volumenstrom in einer Rohrleitung ist nach der Kontinuitätsgleichung (Gl.1.14) von der Strömungsgeschwindigkeit und vom Rohrquerschnitt abhängig. Beim Einbau eines Wirkdruckgebers (auch als Drosselgerät bezeichnet) erhöht sich an der Einschnürungsstelle die Strömungsgeschwindigkeit auf Kosten der Druckenergie (*Bernoulli-*Gleichung, Gl.1.18). An dieser Stelle entsteht eine Druckdifferenz, die als Wirkdruck Δp_w bezeichnet wird. Hinter dem Wirkdruckgeber wird die erhöhte Strömungsenergie nur zum Teil wieder in Druckenergie umgesetzt, während der übrige Teil als bleibender Druckverlust Δp_v (Gl.6) auftritt (Bei der Berechnung nach Gl.6 ist die Strömungsgeschwindigkeit vor der Drosselstelle einzusetzen). Für den Volumenstrom \dot{V} ergibt sich nach einigen Umformungen aus *Kontinuitäts-* und *Bernoulli-* Gleichung:

$$\dot{V} = \alpha \times \epsilon \times m \times A_D \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta p_w}{\rho_1}} \quad (7)$$

Dabei stellen α eine dimensionslose Durchflußzahl, ϵ eine dimensionslose Expansionszahl, m ein dimensionsloses Öffnungsverhältnis, A_D den Rohrquerschnitt und ρ_1 die Dichte des Mediums vor der Drosselstelle dar. Mit der Durchflußzahl α wird der Einfluß von Reibung und Einschnürung der Strömung berücksichtigt. Sie hängt von verschiedenen Einflußgrößen, wie Strömungsgeschwindigkeit, Viskosität, Öffnungsverhältnis, Ort der Druckmessung, Oberflächenbeschaffenheit der Rohrleitung, ab. Für ihre Bestimmung gibt es Nomogramme (Anlage 1). Die Expansionszahl ϵ berücksichtigt die Dichteänderung kompressibler Medien infolge der Ausdehnung nach dem Wirkdruckgeber. Für Flüssigkeiten ist $\epsilon = 1$, Die Expansionszahl der Gase sind aus den Nomogrammen der Anlage 2 ersichtlich. Die drei im Labor Strömungstechnik verwendeten Wirkdruckgeber werden nachfolgend vorgestellt:

- Venturirohr

Venturirohre bestehen aus einem düsenförmigen Einlaufteil, einem zylindrischen Teil (Einschnürung) und einem Diffusor. *Abb.7* zeigt den schematischen Aufbau eines Venturirohres.

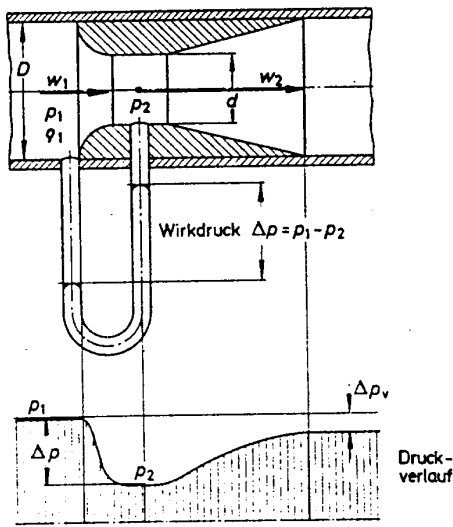


Abb.7 Venturirohr mit Druckverlauf

In dieser Abbildung ist auch der charakteristische Druckverlauf eingezeichnet, wie er prinzipiell ähnlich bei Normblende und -düse auftritt. Bei dem verwendeten Venturirohr handelt es sich um ein nichtgenormtes Drosselgerät. Die nach DIN 1952 genormte Ausführung wird als Normventuridüse bezeichnet.

- Normblende, Normdüse

Eine Normblende *Abb.8* besteht aus einer ebenen Scheibe mit kreisförmiger scharfkantiger Einlauföffnung sowie Fassungsringen, die Druckentnahmebohrungen bzw -schlitze enthalten.

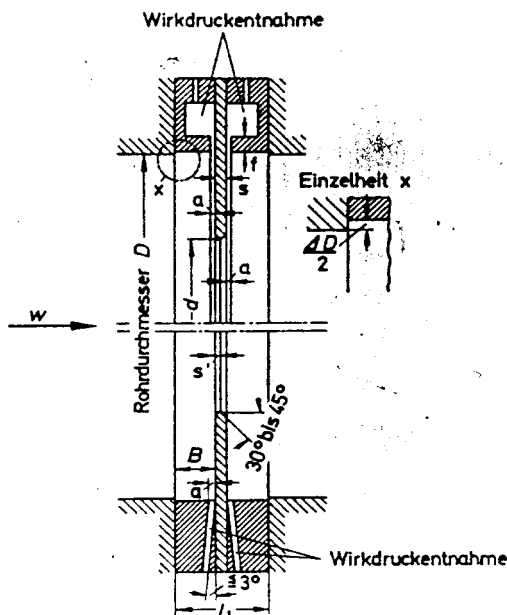


Abb.8 Normblende

Die Messung mit Normblenden ist sehr genau. Es tritt aber aufgrund der Wirbelbildung an der plötzlichen Querschnittsverengung ein relativ hoher bleibender Druckverlust. Dieser Nachteil tritt bei der Normdüse *Abb.9* nicht auf. In *Abb.10* ist ein Diagramm zur Bestimmung der Widerstandsbeiwerte von Wirkdruckgebern dargestellt.

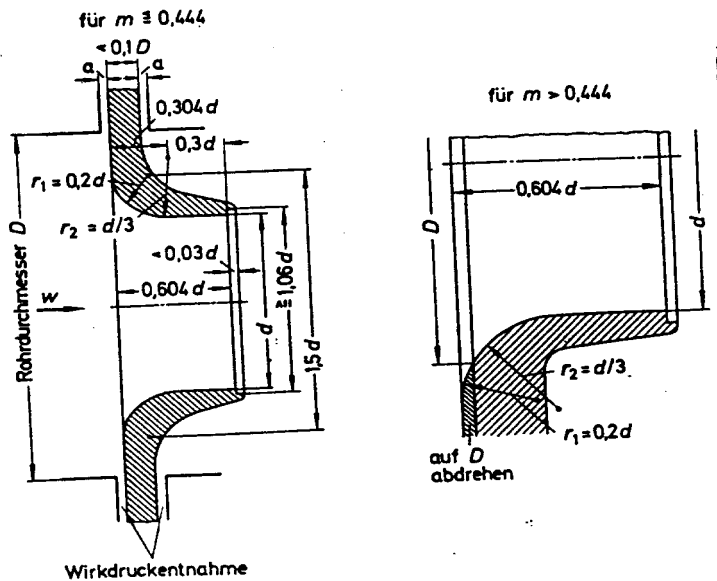
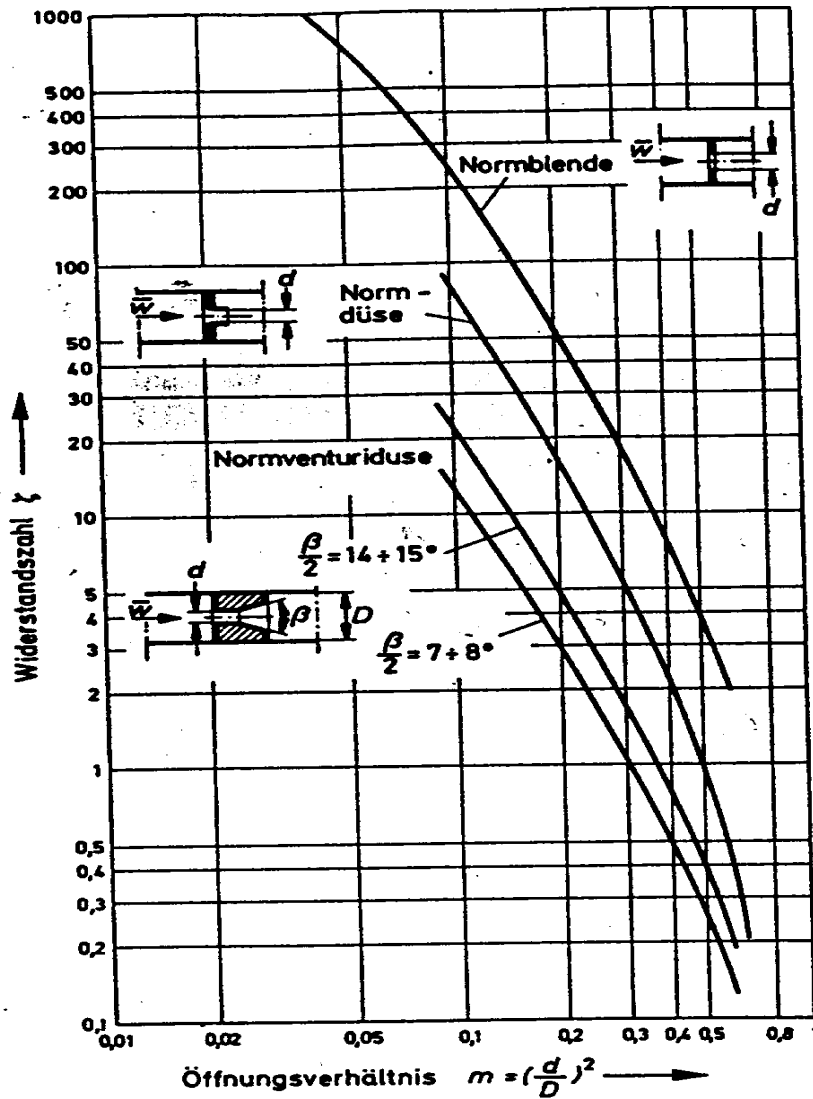


Abb.9 Normdüse

Normblenden und Normdüsen sind nach DIN 1952 standardisiert. Zusammenfassend sind in Tab.1 die Vor- und Nachteile der Wirkdruckgeber gegenübergestellt.

	Blende	Düse	Venturidüse
Vorteile	einfache Form; leichte normgerechte Herstellung; niedriger Preis; geringe Masse; kurze Einbaulänge; einfache Einbaumöglichkeit in die Rohrleitung (Steckblende)	Messung größerer Strömungsgeschwindigkeiten; unempfindlicher gegen verschmutzte Medien als Blende	sehr kleiner Druckverlust; geringe Schmutz- und Korrosionsempfindlichkeit
Nachteile	empfindlich gegen Verschmutzung und Korrosion; bei großen Strömungsgeschwindigkeiten und hohen Temperaturen Abnutzung der Einlaufkante	größere Masse und höherer Preis gegenüber Blende; nicht ganz einfache Herstellung; umständlicher Einbau	große Masse; schwierige Herstellung; sehr hoher Preis; sehr große Baulänge

Tab.1 Gegenüberstellung standardisierter Wirkdruckgeber



$$z = \frac{1}{m^2 \times a^2}$$

Abb.10 Widerstandsbeiwerte von Wirkdruckgebern (Drosselgeräten)

Bei der Verwendung von Wirkdruckgebern ist auf ihre richtige Anordnung in der Rohrleitung zu achten, da sie sehr empfindlich auf Störungen in der Zulauf- und Ablaufströmung reagieren. Rohreinbauten, die derartige Störungen verursachen können (z.B. Krümmer, Ventile), müssen daher in genügendem Abstand vom Wirkdruckgeber eingebaut sein. Der Wirkdruck selbst wird meist mit U-Rohr-Manometern gemessen. Das Meßprinzip eines U-Rohr-Manometers beruht auf dem Vergleich der Druckkraft, die vom zu messenden Druck verursacht wurde, mit dem Gewicht einer Flüssigkeitssäule in einem U-förmigen meist aus Glas gefertigten dünnen Rohr. Die Flüssigkeit im U-Rohr wird als Sperrflüssigkeit bezeichnet. Die Auswahl der Sperrflüssigkeit erfolgt nach der gewünschten Größe des Meßbereiches. Dabei ist die Dichte ρ_{sp} das Auswahlkriterium. Übliche Sperrflüssigkeiten sind Wasser, Quecksilber, Alkohol oder Tetrachlorkohlenstoff. *Abb.11* zeigt den prinzipiellen Aufbau eines einfachen U-Rohr-Manometers.

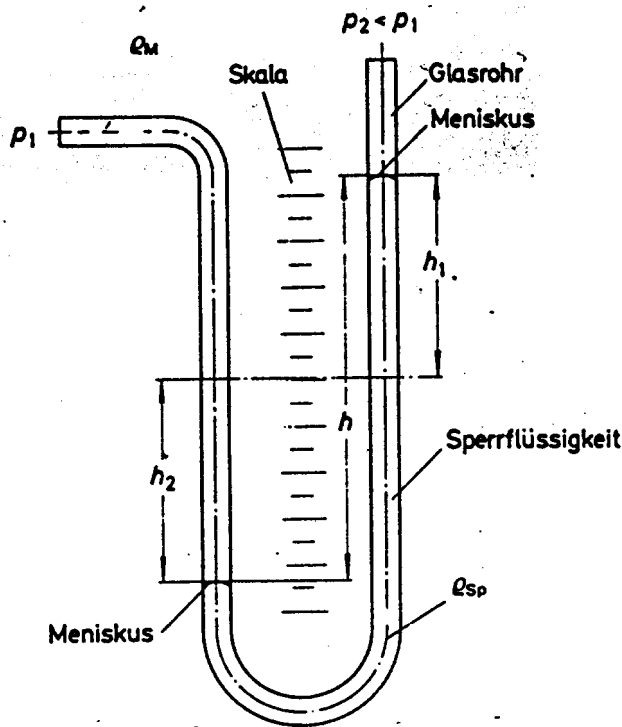


Abb.11 Gleichschenkliges U-Rohr-Manometer

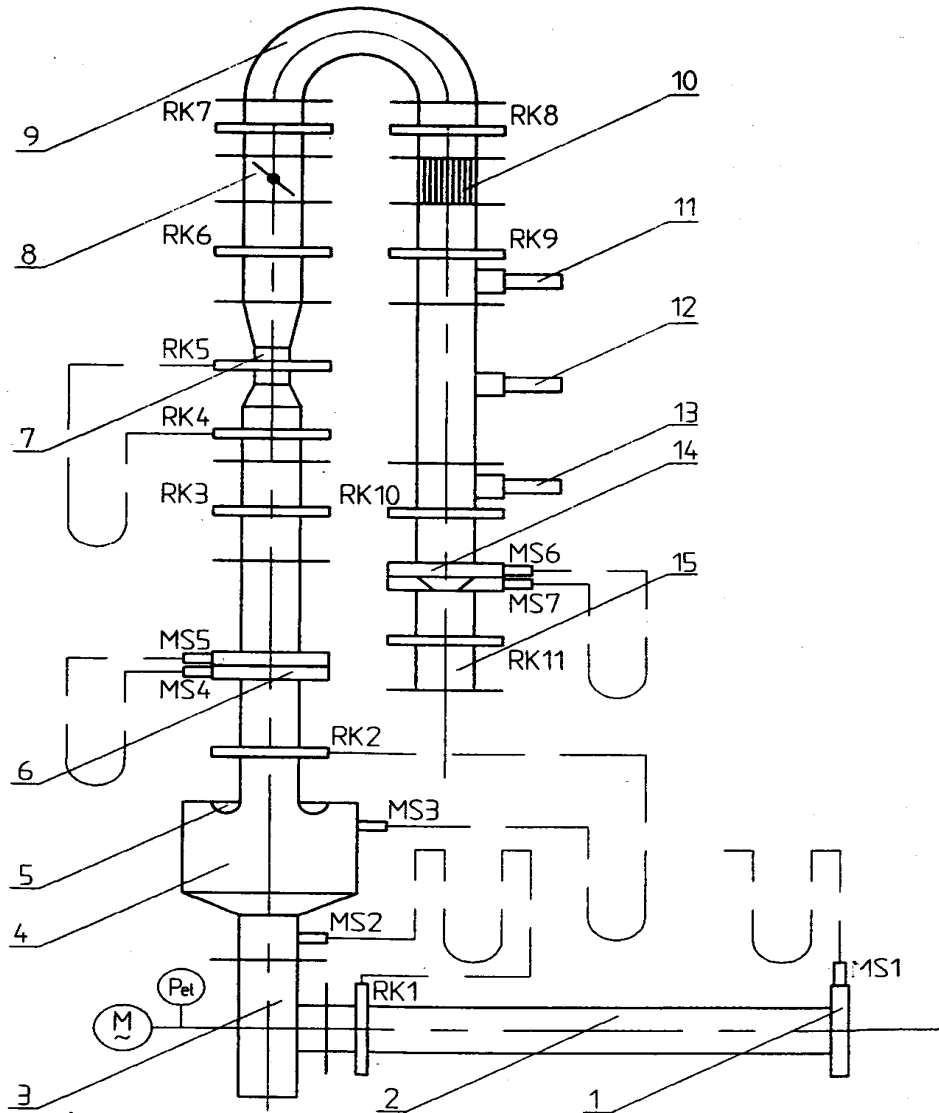
Der Druck wird entweder direkt oder als Höhendifferenz h beider Menisken der Sperrflüssigkeit abgelesen. Es gilt:

$$p_1 - p_2 = (r_{sp} - r_M) \times g \times h \quad (8)$$

Bei gas- und dampfförmigen Fluiden kann ρ_M gegenüber ρ_{sp} vernachlässigt werden. Für sehr genaue Messungen muß der Einfluß der Temperatur auf die Ausdehnung von Sperrflüssigkeit und Gerät sowie die Wirkung von Kapillarität und Oberflächenspannung berücksichtigt werden. Die Ablesegenauigkeit kann durch Verwendung besonderer Ablesevorrichtungen mit Nonius oder optischer Vergrößerung verbessert werden.

2. Versuchsaufbau

Der Versuch wird an einer Rohrleitungsstrecke NW 160 mit einem Radialgebläse durchgeführt. Die Rohrleitungsstrecke besteht aus folgenden Elementen:



- | | | |
|---|---|------|
| - Eintrittsblende (variabler Durchmesser) | (1) - Saugrohr (l = 1,4 m) | (2) |
| - Radialventilator LRHM 160/1 W
(V = 640 ... 1840 m ³ /h) | (3) - Druckkammer mit Sichtfenster | (4) |
| - Normblende | - Konfusor | (5) |
| ($\alpha = 1,3$, d = 125 mm, D = 160 mm) | (6) - Venturirohr | (7) |
| ($\alpha = 2,05$, d = 135 mm, D = 160 mm) | (8) - Umlenkrohr (2 x 90° Segmentkrümmer) | (9) |
| - Drosselklappe ($\beta_{DK} = 0 \dots 90^\circ$) | (10) - Prandtl-Rohr (3 mm) | (11) |
| - Gleichrichter (l = 0,3 mm) | (12) - Normdüse | (14) |
| - Prandtl-Rohr (stromlinienförmig) | (13) ($\alpha = 1,146$, d = 100 mm, D = 160 mm) | |
| - Prandtl-Rohr (10 mm) | (15) - MS 1 ...7 Meßstutzen | |
| - Abschlußrohr | - RK 1 ... 11 Ringkollektoren | |

Abb.12 Aufbau des Versuchsstandes

Dazu kommen noch vier gerade Rohrleitungsabschnitte mit einer Gesamtlänge von 8,50 m. Der Aufbau des Versuchsstandes, der auch für andere strömungstechnische Untersuchungen genutzt wird, ist aus *Abb.12* ersichtlich.

3. Versuchsdurchführung

- Inbetriebnahme des Radialventilators nach den Anweisungen des Laborleiters/-ingenieurs
- Aufnahme der Meßwerte bei den folgenden Drosselklappenwinkeln und Drehzahlen des Radialventilators

$$\beta_{DK} = 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ; 50^\circ; 60^\circ; 70^\circ$$

$$n = 3000 \text{ min}^{-1} \text{ und } n = 2500 \text{ min}^{-1}$$

- Meßwerte :	atmosphärische Lufttemperatur t_0	[°C]
	atmosphärischer Luftdruck p_0	[mbar]
	Wirkdruck Normblende Δp_{wNB}	[kPa] (MS4/5)
	Wirkdruck Venturirohr Δp_{wVR}	[kPa] (RK4/5)
	Wirkdruck Normdüse Δp_{wND}	[kPa] (MS6/7)
	Druckverlust Drosselklappe Δp_{vDK}	[kPa] (RK6/7)
	Druckverlust Umlenkrohr Δp_{vUR}	[kPa] (RK7/8)
	Druckverlust Gleichrichter Δp_{vG}	[kPa] (RK8/9)
	Druckverlust Rohrleitungsstrecke Δp_{vGe}	[kPa] (RK2/11)
	Strömungsgeschwindigkeit w_{SA} am Austritt des Abschlußrohres	[m/s]

(Dieser Wert wird mit einem Hitzdrahtanemometer gemessen. Das Meßgerät ist am Griff in das Zentrum des Luftstromes an der Austrittsöffnung der Rohrleitungsstrecke zu halten. Die Messung wird jeweils dreimal wiederholt.)

- Außerbetriebnahme des Radialventilators

4. Versuchsauswertung

4.1 Berechnung und Darstellung der Kenngrößen

Aus den Meßwerten sind für alle Drosselklappenwinkel β_{DK} zu berechnen und in übersichtlicher tabellarischer Form darzustellen:

- Luftdichte ρ [kg/m³] (Gl.2)
mit den Werten für den Normzustand
 $\rho_1 = 1,225 \text{ kg/m}^3$, $T_1 = 273,15 \text{ K}$, $p_1 = 1013,25 \text{ mbar}$
- Volumenstrom \dot{V}_{NB} (mit Normblende) [m³/h] (Gl.7)
- Volumenstrom \dot{V}_{ND} (mit Normdüse) [m³/h] (Gl.7)
- Volumenstrom \dot{V}_{VR} (mit Venturirohr) [m³/h] (Gl.7)
- Volumenstrom \dot{V}_{SA} (mit Schalenkreuzanemometer) [m³/h] (Gl.1.8)
- mittlere Strömungsgeschwindigkeit in den geraden Rohrleitungsabschnitten
 w_{RL} (mit $\dot{V} = (\dot{V}_{NB} + \dot{V}_{ND})/2$) [m/s] (Gl.1.8)
- Reynoldszahl in den geraden Rohrleitungsabschnitten Re_{RL}
(mit $v_{Luft} = 15,1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) [-] (Gl.1.23)
- Druckverlust Normblende Δp_{vNB} [kPa] (Gl.6)
- Druckverlust Normdüse Δp_{vND} [kPa] (Gl.6)
- Druckverlust Venturirohr Δp_{vVR} [kPa] (Gl.6)
- Druckverlust Drosselklappe Δp_{vDK} [kPa] (Gl.6)
- Druckverlust Umlenkrohr Δp_{vUR} [kPa] (Gl.6)

Es sind folgende Zusammenhänge grafisch darzustellen :

Die verschiedenen Drehzahlen sind in einem Diagramm darzustellen

- $w_{RL} = f(\beta_{DK})$
- $\Delta p_{vNB} = f(\beta_{DK})$
- $\Delta p_{vND} = f(\beta_{DK})$
- $\Delta p_{vVR} = f(\beta_{DK})$
- $\Delta p_{vDK} = f(\beta_{DK})$
- $\Delta p_{vUR} = f(\beta_{DK})$
- $\Delta p_{vG} = f(\beta_{DK})$
- $\Delta p_{vGe} = f(\beta_{DK})$

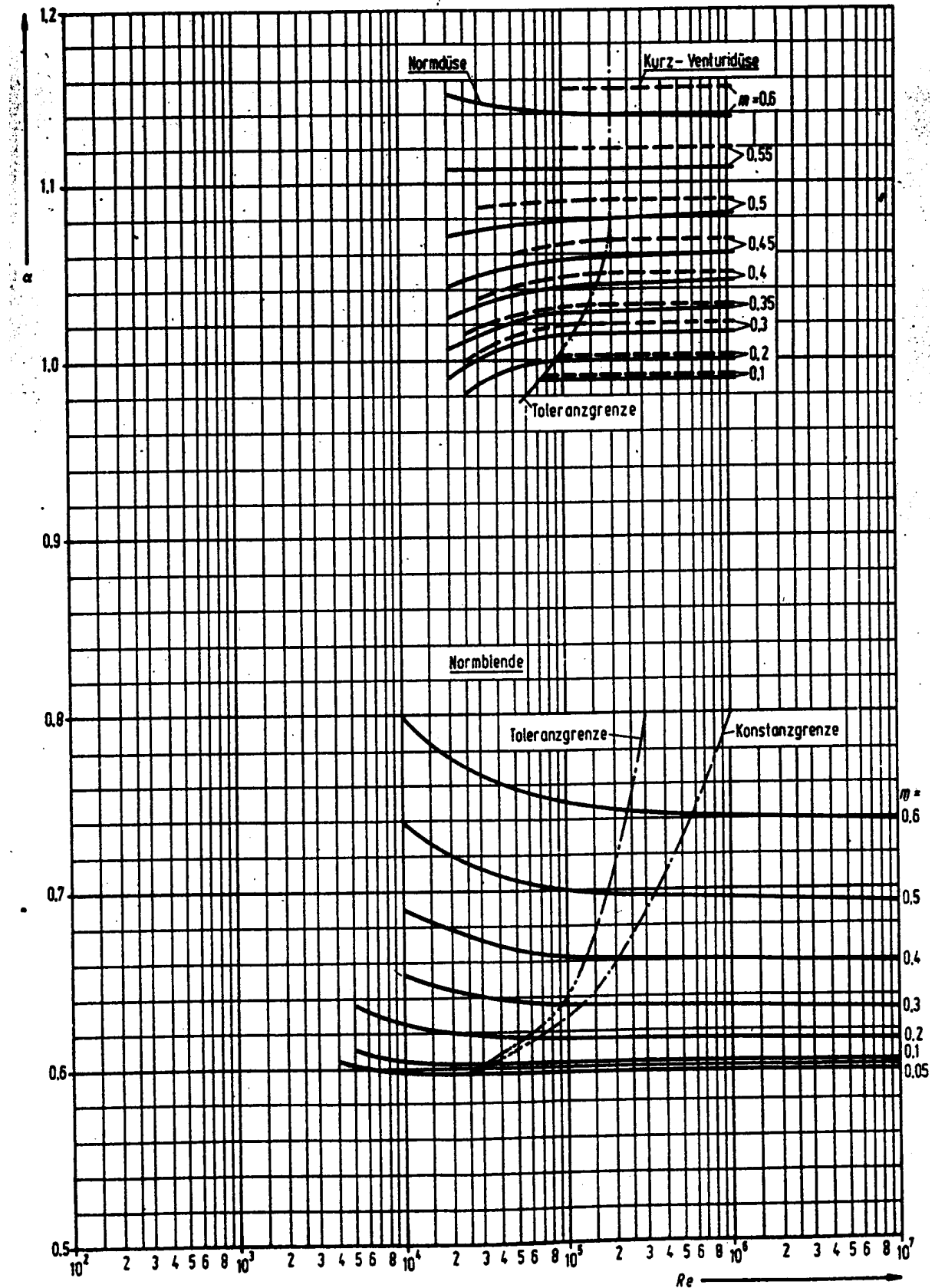
4.2 Diskussion der Ergebnisse

- Beurteilung der Kompressibilität der Strömung mittels der Strömungsgeschwindigkeiten
- Bestimmung der Strömungsart mittels der *Reynolds-Zahl* Re_{RL}
- Vergleich der gemessenen mit den berechneten Druckverlusten für Drosselklappe und Umlenkrohr
- Vergleich der mit den verschiedenen Meßverfahren berechneten Volumenströme
- Erläuterung der Kurvenverläufe
- Erstellung einer ausführlichen Fehleranalyse, Fehlerberechnung und Fehlereinschätzung.

Zum Abschluß des Versuches sind Aussagen zu Treffen bei welchen Eingangsbedingungen eine **Laminare Strömung** erreicht werden kann, und mit welchen Mitteln dieses realisiert werden kann.

Anlage 1.

Diagramm zur Bestimmung der Durchflüßzahlen von Wirkdruckgebern nach DIN



Anlage 2

Nomogramm zur Bestimmung der Expansionszahl

Tafel 2.13. Expansionszahl ϵ für Normblenden [2.21]

n	n ²	ϵ bei $p_2/p_1 =$									
		1,0	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,85	0,80	0,75	
1,20	0,0000	0,00	1,0	0,9919	0,9845	0,9774	0,9703	0,9634	0,9463	0,9294	0,9126
	0,3162	0,10	1,0	0,9912	0,9832	0,9754	0,9678	0,9603	0,9417	0,9233	0,9051
	0,4472	0,20	1,0	0,9905	0,9819	0,9735	0,9652	0,9571	0,9371	0,9173	0,8976
	0,5477	0,30	1,0	0,9898	0,9806	0,9715	0,9627	0,9540	0,9325	0,9112	0,8901
	0,6325	0,40	1,0	0,9892	0,9792	0,9696	0,9602	0,9508	0,9278	0,9052	0,8826
	0,6403	0,41	1,0	0,9891	0,9791	0,9694	0,9599	0,9505	0,9274	0,9046	0,8819
1,30	0,0000	0,00	1,0	0,9925	0,9856	0,9790	0,9724	0,9659	0,9499	0,9341	0,9183
	0,3162	0,10	1,0	0,9919	0,9844	0,9772	0,9700	0,9630	0,9456	0,9284	0,9112
	0,4472	0,20	1,0	0,9912	0,9832	0,9754	0,9677	0,9601	0,9413	0,9227	0,9042
	0,5477	0,30	1,0	0,9906	0,9819	0,9735	0,9653	0,9572	0,9370	0,9171	0,8972
	0,6325	0,40	1,0	0,9899	0,9807	0,9717	0,9629	0,9542	0,9327	0,9114	0,8902
	0,6403	0,41	1,0	0,9899	0,9806	0,9716	0,9627	0,9539	0,9323	0,9109	0,8895
1,40	0,0000	0,00	1,0	0,9930	0,9866	0,9803	0,9742	0,9681	0,9531	0,9381	0,9232
	0,3162	0,10	1,0	0,9924	0,9854	0,9787	0,9720	0,9654	0,9491	0,9328	0,9166
	0,4472	0,20	1,0	0,9918	0,9843	0,9770	0,9698	0,9627	0,9450	0,9275	0,9100
	0,5477	0,30	1,0	0,9912	0,9831	0,9753	0,9676	0,9599	0,9410	0,9222	0,9034
	0,6325	0,40	1,0	0,9906	0,9820	0,9736	0,9653	0,9572	0,9370	0,9169	0,8968
	0,6403	0,41	1,0	0,9905	0,9819	0,9734	0,9651	0,9596	0,9366	0,9164	0,8961
1,66	0,0000	0,00	1,0	0,9940	0,9885	0,9832	0,9779	0,9727	0,9597	0,9466	0,9335
	0,3162	0,10	1,0	0,9935	0,9875	0,9817	0,9760	0,9703	0,9562	0,9421	0,9278
	0,4472	0,20	1,0	0,9930	0,9866	0,9803	0,9741	0,9680	0,9527	0,9375	0,9221
	0,5477	0,30	1,0	0,9925	0,9856	0,9788	0,9722	0,9656	0,9493	0,9329	0,9164
	0,6325	0,40	1,0	0,9920	0,9846	0,9774	0,9703	0,9633	0,9458	0,9283	0,9107
	0,6403	0,41	1,0	0,9919	0,9845	0,9773	0,9701	0,9630	0,9455	0,9279	0,9101

Tafel 2.14. Expansionszahl ϵ für Normdüsen und Normventuridüsen [2.21]

n	n ²	ϵ bei $p_2/p_1 =$									
		1,0	0,98	0,96	0,94	0,92	0,90	0,85	0,80	0,75	
1,20	0,0000	0,00	1,0	0,9874	0,9748	0,9620	0,9491	0,9361	0,9029	0,8689	0,8340
	0,3162	0,10	1,0	0,9856	0,9712	0,9568	0,9423	0,9278	0,8913	0,8543	0,8169
	0,4472	0,20	1,0	0,9834	0,9669	0,9504	0,9341	0,9178	0,8773	0,8371	0,7970
	0,5477	0,30	1,0	0,9805	0,9613	0,9424	0,9238	0,9053	0,8602	0,8163	0,7733
	0,6325	0,40	1,0	0,9767	0,9541	0,9320	0,9105	0,8895	0,8390	0,7909	0,7448
	0,6403	0,41	1,0	0,9763	0,9532	0,9308	0,9090	0,8877	0,8366	0,7881	0,7416
1,30	0,0000	0,00	1,0	0,9884	0,9767	0,9649	0,9529	0,9408	0,9100	0,8783	0,8457
	0,3162	0,10	1,0	0,9867	0,9734	0,9600	0,9466	0,9331	0,8990	0,8645	0,8294
	0,4472	0,20	1,0	0,9846	0,9693	0,9541	0,9389	0,9237	0,8859	0,8481	0,8102
	0,5477	0,30	1,0	0,9820	0,9642	0,9466	0,9292	0,9120	0,8697	0,8283	0,7875
	0,6325	0,40	1,0	0,9785	0,9575	0,9369	0,9168	0,8971	0,8495	0,8039	0,7599
	0,6403	0,41	1,0	0,9781	0,9567	0,9358	0,9154	0,8954	0,8472	0,8012	0,7569
1,40	0,0000	0,00	1,0	0,9892	0,9783	0,9673	0,9562	0,9449	0,9162	0,8865	0,8558
	0,3162	0,10	1,0	0,9877	0,9753	0,9628	0,9503	0,9377	0,9058	0,8733	0,8402
	0,4472	0,20	1,0	0,9857	0,9715	0,9573	0,9430	0,9288	0,8933	0,8577	0,8219
	0,5477	0,30	1,0	0,9833	0,9667	0,9503	0,9340	0,9178	0,8780	0,8388	0,8000
	0,6325	0,40	1,0	0,9800	0,9604	0,9412	0,9223	0,9038	0,8588	0,8154	0,7733
	0,6403	0,41	1,0	0,9796	0,9596	0,9401	0,9209	0,9021	0,8566	0,8127	0,7704
1,66	0,0000	0,00	1,0	0,9909	0,9817	0,9724	0,9629	0,9533	0,9288	0,9033	0,8768
	0,3162	0,10	1,0	0,9896	0,9791	0,9685	0,9578	0,9471	0,9197	0,8917	0,8629
	0,4472	0,20	1,0	0,9879	0,9759	0,9637	0,9516	0,9394	0,9088	0,8778	0,8464
	0,5477	0,30	1,0	0,9858	0,9718	0,9577	0,9438	0,9299	0,8953	0,8609	0,8265
	0,6325	0,40	1,0	0,9831	0,9664	0,9499	0,9336	0,9176	0,8782	0,8397	0,8020
	0,6403	0,41	1,0	0,9827	0,9657	0,9490	0,9324	0,9161	0,8762	0,8373	0,7993