



Prozessmesstechnik und Sensorik

Vorlesung:

Durchflussmessung nach dem Wirkdruckverfahren

Prüfungsfragen

- Beschreiben Sie Aufbau und Funktionsprinzipien folgender Durchflussmesser:
 - Wirkdruck-Durchflussmesser
 - Coriolis-Durchflussmesser
 - Vortex-Durchflussmesser
 - Magnetisch-induktiver Durchflussmesser
 - Akustischer Durchflussmesser



Durchfluss als Prozessparameter

Die Durchflussmessung dient der mengenmäßigen Erfassung von strömenden Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen und ist in der Industrie und Wirtschaft von essenzieller Bedeutung. Zum Beispiel für:

- die Steuerung der Beschickung von verfahrenstechnischen Apparaten (Chemiereaktoren, Trennkolonnen, etc.)
- die Steuerung und Überwachung energietechnischer Anlagen (z.B. Dampfmengenmessung in Kraftwerksanlagen)
- die Dampfmengenmessung in der Prozessindustrie und Wärmeversorgung
- die Erfassung von Liefermengen für Erdgas und Erdöl
- die Erfassung des Verbrauchs technischer Gase
- die Erfassung der Abgabemenge von Kraftstoffen
- die Erfassung des Verbrauchs von Gas und Wasser beim Endkunden (durch sogenannte Gasuhren oder Wasseruhren)



Die Messung des Durchflusses erfolgt ...

hauptsächlich in geschlossenen Kanälen (Rohrgeometrien),



seltener an offenen Gerinnen

- Schmutzwassermessung
- Staustufen und Wehre



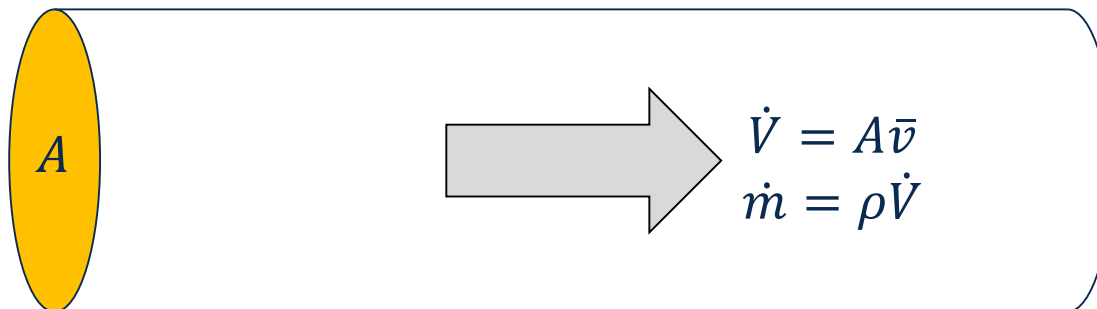
Grundlagen der Durchflussmessung in Rohren

Voraussetzung: Das Rohr wird von einem einphasigen Stoff durchströmt (kein Stoff- oder Phasengemisch). Zielgrößen der Messung sind entweder der **Volumenstrom**

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt}$$

oder der **Massestrom**

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V)}{dt} = \rho \dot{V}$$

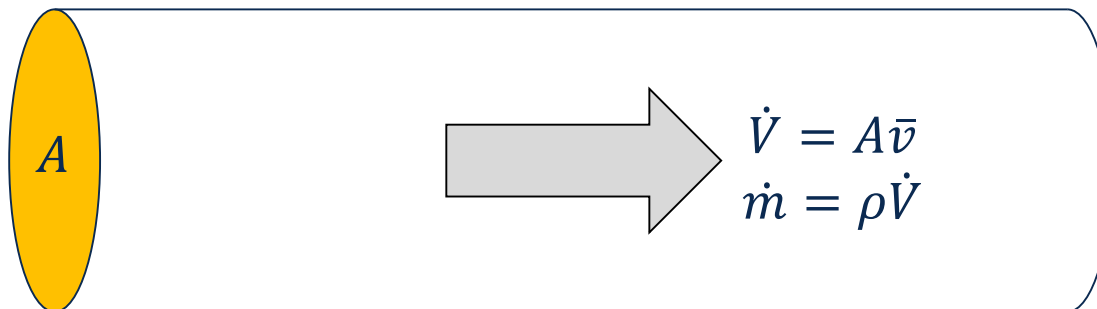


Grundlagen der Durchflussmessung in Rohren

Häufig wird der Volumenstrom gemessen. Einzige Ausnahme ist der Coriolis-Durchflussmesser. Soll aus einem Volumenstrom ein Massestrom bestimmt werden, ist die Abhängigkeit der Stoffdichte von Druck (bei Gasen) und Temperatur zu berücksichtigen:

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

Daher müssen Stofftemperatur und Absolutgasdruck häufig mit dem Volumenstrom erfasst werden.



Grundlagen der Durchflussmessung in Rohren

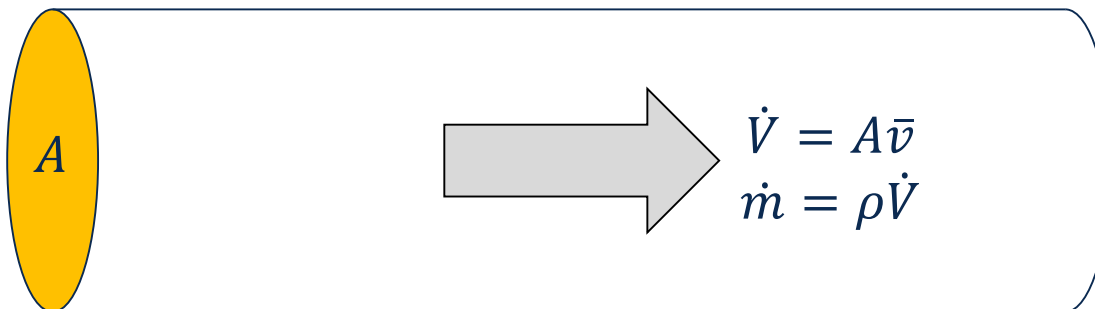
Bei den meisten Durchflussmessverfahren wird der Volumenstrom aus der gemessenen mittleren Strömungsgeschwindigkeit \bar{v} berechnet. Es gilt

$$\dot{V} = A\bar{v}$$

mit dem Querschnitt A des Rohres. Für runde Rohre gilt

$$A = \frac{\pi}{4}D^2 = \pi R^2$$

mit dem Rohrdurchmesser D und dem Rohrradius R .

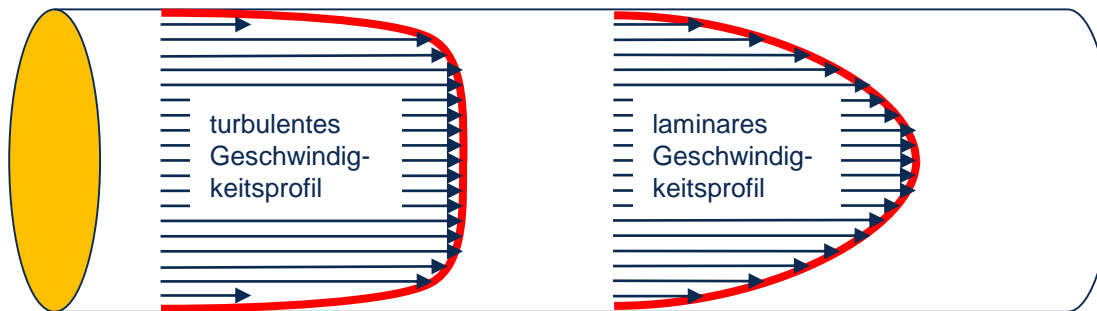


Grundlagen der Durchflussmessung in Rohren

Die Strömung im Rohr kann entweder laminar oder turbulent sein. Als Ähnlichkeitskennzahl dient die Reynoldszahl:

$$Re = \frac{\rho \bar{v} D}{\eta}$$

mit der dynamischen Viskosität η . Unterhalb der kritischen Reynoldszahl $Re_{krit} \approx 2300$ ist die Strömung laminar. Oberhalb kann sie in einem gewissen Unsicherheitsbereich in turbulent umschlagen. Entsprechend stellen sich radialsymmetrische Strömungsprofile im Rohr ein. Bei laminarer Strömung ist das Profil streng parabolisch, für turbulente Strömung konstant bis auf den Randbereich.



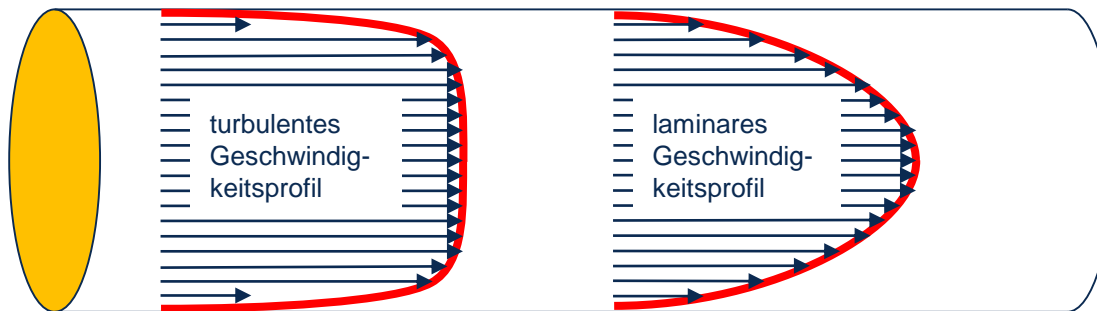
Grundlagen der Durchflussmessung in Rohren

Für ein symmetrisches Strömungsprofil ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit durch

$$\bar{v} = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{2\pi}{A} \int_0^R r v(r) dr$$

gegeben. Bei einigen Durchflussmessverfahren wird eine repräsentative Geschwindigkeit, zum Beispiel in der Rohrmitte, oder die Durchschnittsgeschwindigkeit entlang eines Zentralstrahls durch das Rohr (akustischer Durchflussmesser) bestimmt. Hier ist zu beachten, dass die Strömung dann auch tatsächlich symmetrisch ist.

Allgemein fordern Durchflussmesser eine voll entwickelte eingelaufene symmetrische Strömung. Die muss durch Einhalten gewisser Geradrohrlängen vor und nach dem Durchflussmesser sichergestellt werden.



Wirkdruck-Durchflussmesser



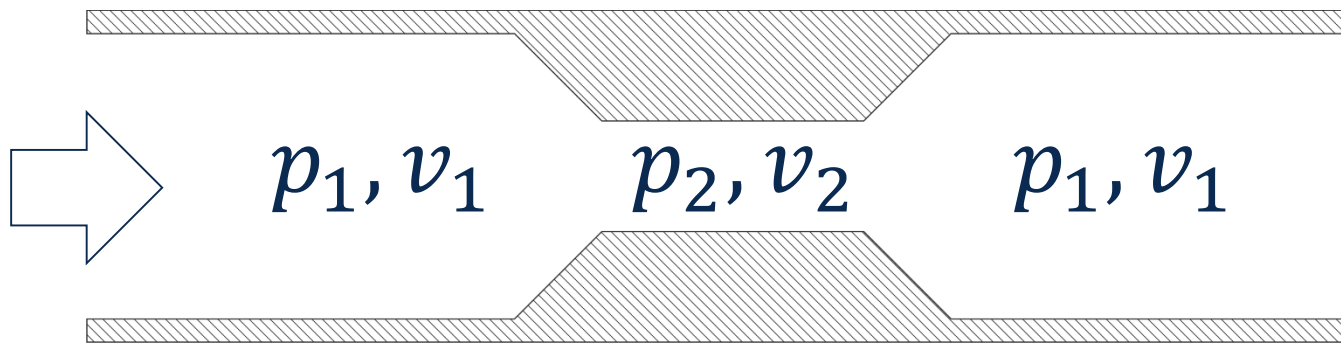
Physikalisches Prinzip

Nach den Gesetzen von Bernoulli gilt für eine reibungsfreie horizontale Rohrströmung an allen Positionen im Rohr

$$p + \frac{\rho}{2} v^2 = \text{const.}$$

Fernerhin gilt Masseerhaltung in jedem Teil des Rohres, also $\dot{m} = \text{const.}$

Für inkompressible Fluide gilt auch Volumenerhaltung: $\dot{V} = \text{const.}$, da die Dichte sich nicht ändert. Wir betrachten im Folgenden zunächst inkompressible Fluide.



Hinweis: Aus Gründen der einfacheren Schreibweise bezeichnet im Folgenden das Symbol v immer die mittlere Geschwindigkeit im Rohr, wenn nicht anders angegeben!



Physikalische Begründung des Gesetzes von Bernoulli

Energie:

Volumenspezifisch

$$E_{dr} = pV$$

$$E_{pot} = mgh$$

$$E_{kin} = \frac{m}{2} v^2$$

$$e_{dr} = \frac{dE_{dr}}{dV} = p$$

$$e_{pot} = \frac{mgh}{V} = \frac{\rho V g h}{V} = \rho g h$$

$$e_{kin} = \frac{m}{2} \frac{v^2}{V} = \frac{\rho}{2} v^2$$

Position 1

Position 2

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 + \cancel{\rho g h_1} = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 + \cancel{\rho g h_2} + h_v \quad \text{Reibung}$$

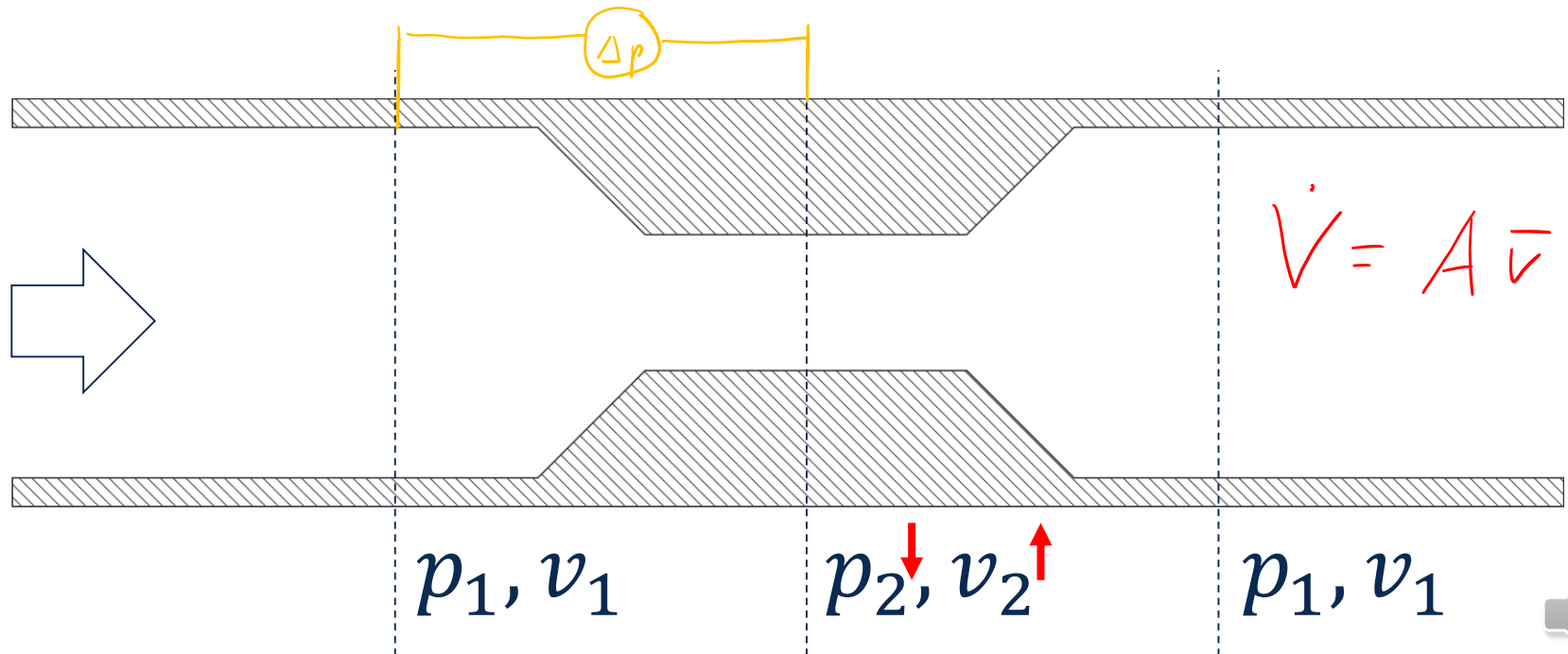
$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 + h_v$$



Physikalisches Prinzip

An einer Drosselstelle verengt sich der Strömungsquerschnitt. Wegen der Masse- und Volumenerhaltung muss die Strömungsgeschwindigkeit zunehmen, also muss nach Bernoulli der Druck abnehmen. Für ein reibungsfreies Fluid gilt demnach

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2$$

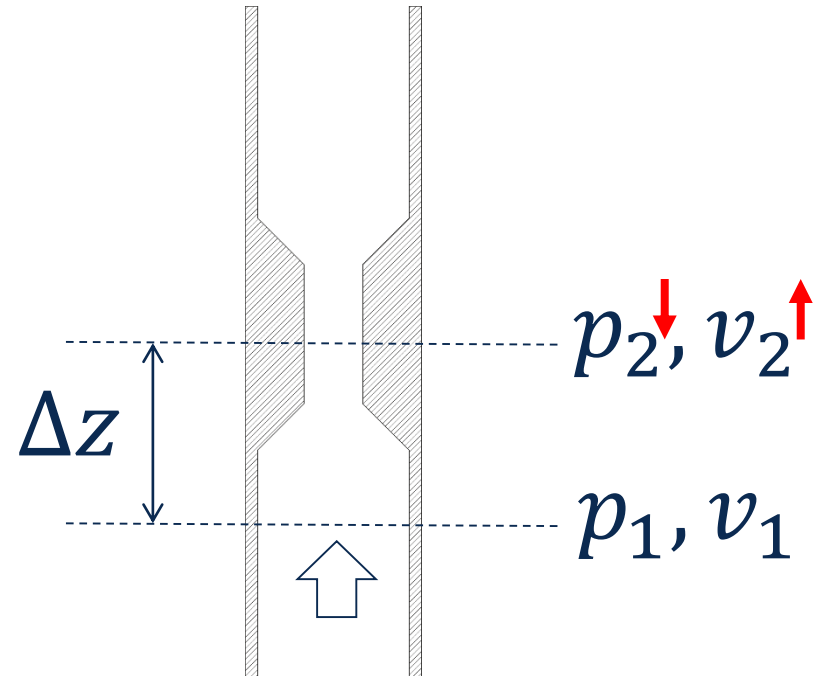


Physikalisches Prinzip

Im allgemeinen Fall gilt mit Reibung im Fluid sowie nicht horizontaler Rohrlage

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 + \rho g \Delta z + h_v$$

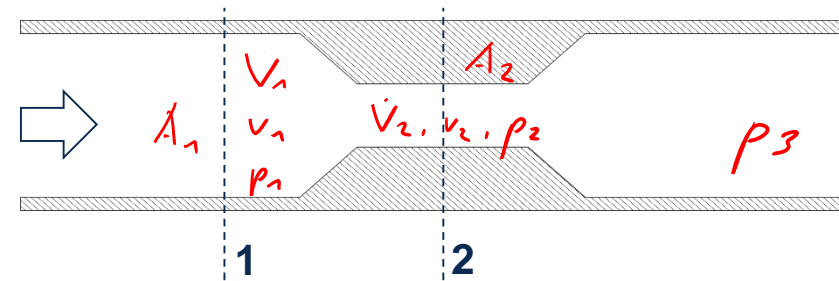
Mit dem Verlustterm h_v wird der Reibungsverlust beschrieben. Wir setzen mit der Betrachtung eines horizontalen Rohrs fort. Der nichthorizontale Fall lässt sich einfach durch Mitführen des Potenzialenergieterms $\rho g \Delta z$ behandeln



Berechnung der Fluidgeschwindigkeit aus dem Wirkdruck an einer Blende

$$V_1 = V_2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$



Öffnungsverhältnis: $m = \frac{A_2}{A_1} = \frac{v_1}{v_2}$

Durchmesserverhältnis: $\beta = \frac{D_2}{D_1}$

Wirkdruck: $\Delta p = p_1 - p_2$

Dimensionslos:

$$\text{Druckverhältnis: } \frac{p_1 - p_3}{p_1 - p_2} = \frac{\Delta p_v}{\Delta p}$$



Berechnung der Fluidgeschwindigkeit aus dem Wirkdruck an einer Blende

$$h_v = \eta (p_1 - p_2)$$

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 + \eta (p_1 - p_2)$$

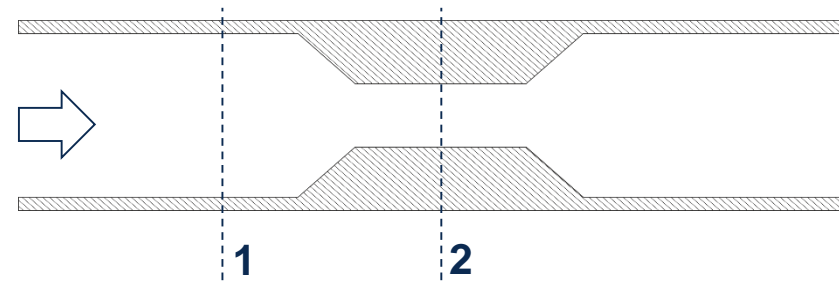
$$(1 - \eta) \Delta p = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2) \quad v_2 = \frac{v_1}{m}$$

$$(1 - \eta) \Delta p = \frac{\rho}{2} \left(\frac{v_1^2}{m^2} - v_1^2 \right) \quad | \cdot m^2$$

$$m^2 (1 - \eta) \Delta p = \frac{\rho}{2} (v_1^2 - m^2 v_1^2)$$

$$m^2 (1 - \eta) \Delta p = \frac{\rho}{2} (1 - m^2) v_1^2 \rightarrow$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 m^2 (1 - \eta) \Delta p}{\rho (1 - m^2)}}$$



Öffnungsverhältnis: $m = \frac{A_2}{A_1} = \frac{v_2}{v_1}$

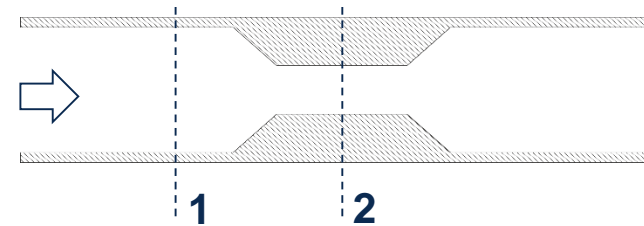
Wirkdruck: $\Delta p = p_2 - p_1$



Berechnung der Fluidgeschwindigkeit aus dem Wirkdruck an einer Blende

$$V_1 = \underbrace{\sqrt{1-\eta}}_C \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{1}{1-m^2}}}_E \cdot m \sqrt{2\Delta p/\rho}$$

$$V_1 = C \cdot E \cdot m \sqrt{2\Delta p/\rho}$$



Durchflusskoeffizient : C
Zulaufgeschwindigkeitsfaktor : E

Durchflusssatz $\alpha = C \cdot E$

| | |
|---------------------|---|
| Öffnungsverhältnis: | $m = \frac{A_2}{A_1} = \frac{v_2}{v_1}$ |
| Wirkdruck: | $\Delta p = p_2 - p_1$ |

$$V_1 = \alpha \cdot m \cdot \sqrt{2\Delta p/\rho}$$

$$\dot{V}_1 = A_1 \cdot \alpha \cdot m \cdot \sqrt{2\Delta p/\rho}$$

$$\dot{V}_1 = A_2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{2\Delta p/\rho}$$

$$A_1 = A_2/m$$



Berechnung der Fluidgeschwindigkeit aus dem Wirkdruck an einer Blende

$$V_1 = A_2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \Delta p / \rho}$$

$$\dot{m}_1 = A_2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \Delta p \cdot \rho} \quad \dot{m} = V \rho$$

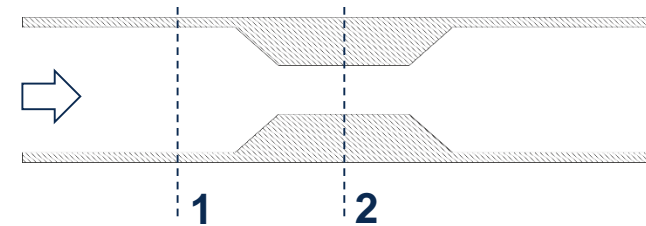
Komprimibles Fluid:

Entspannung, Arbeit wird verrichtet

Adiabatische Entspannung

$$V_1 = \varepsilon \cdot A_2 \cdot \alpha \cdot \sqrt{2 \Delta p / \rho}$$

Expansionszahl: ε : $\varepsilon \leq 1$ $\varepsilon \sim 0,97 \dots 1$



Öffnungsverhältnis: $m = \frac{A_2}{A_1} = \frac{v_2}{v_1}$

Wirkdruck: $\Delta p = p_2 - p_1$



Beziehung zwischen Druckverlust und Durchfluss

$$\dot{V} = \varepsilon A_2 \sqrt{1 - \eta} \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \sqrt{2\Delta p / \rho}$$

$$\dot{m} = \varepsilon A_2 \sqrt{1 - \eta} \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \sqrt{2\rho\Delta p}$$

Durchflusskoeffizient:

$$C = \sqrt{1 - \eta}$$

Beschreibt Reibungsverluste und berücksichtigt damit Strömungsprofil, Turbulenzgrad und Lage der Druckentnahmestellen; wird experimentelle bestimmt

Zulaufgeschwindigkeitsfaktor:

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}}$$

Steht für die Querschnittverengung der Blende

Durchflusszahl:

$$\alpha = CE$$

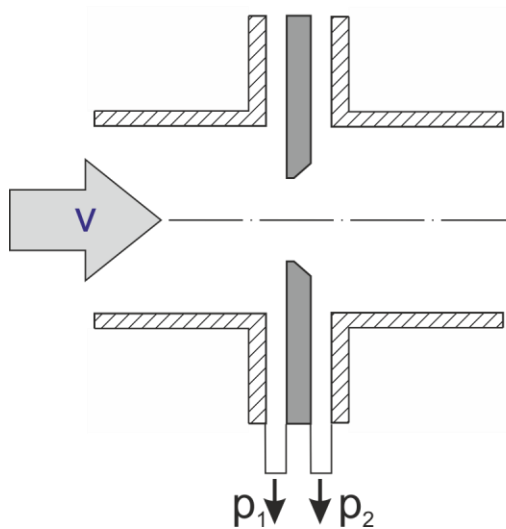
Expansionszahl:

$$\varepsilon$$

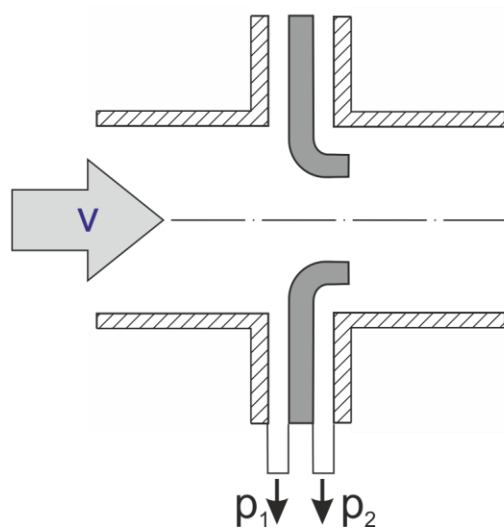
Korrigiert die Geschwindigkeitserhöhung in der Blende durch adiabate Expansion



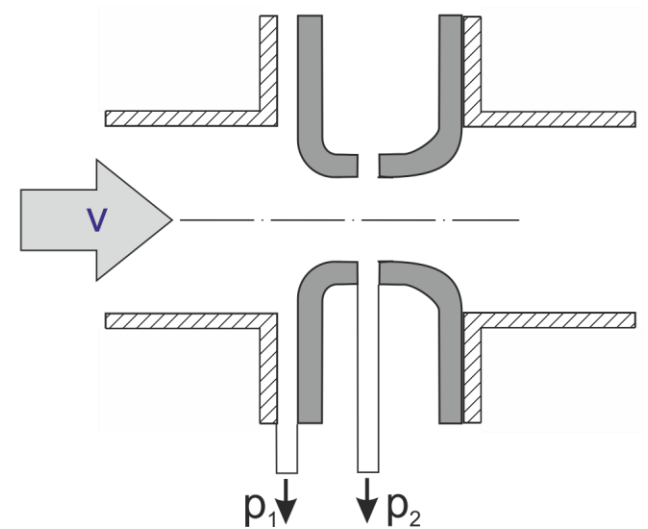
Bauformen von Drosseleinsätzen



Blende



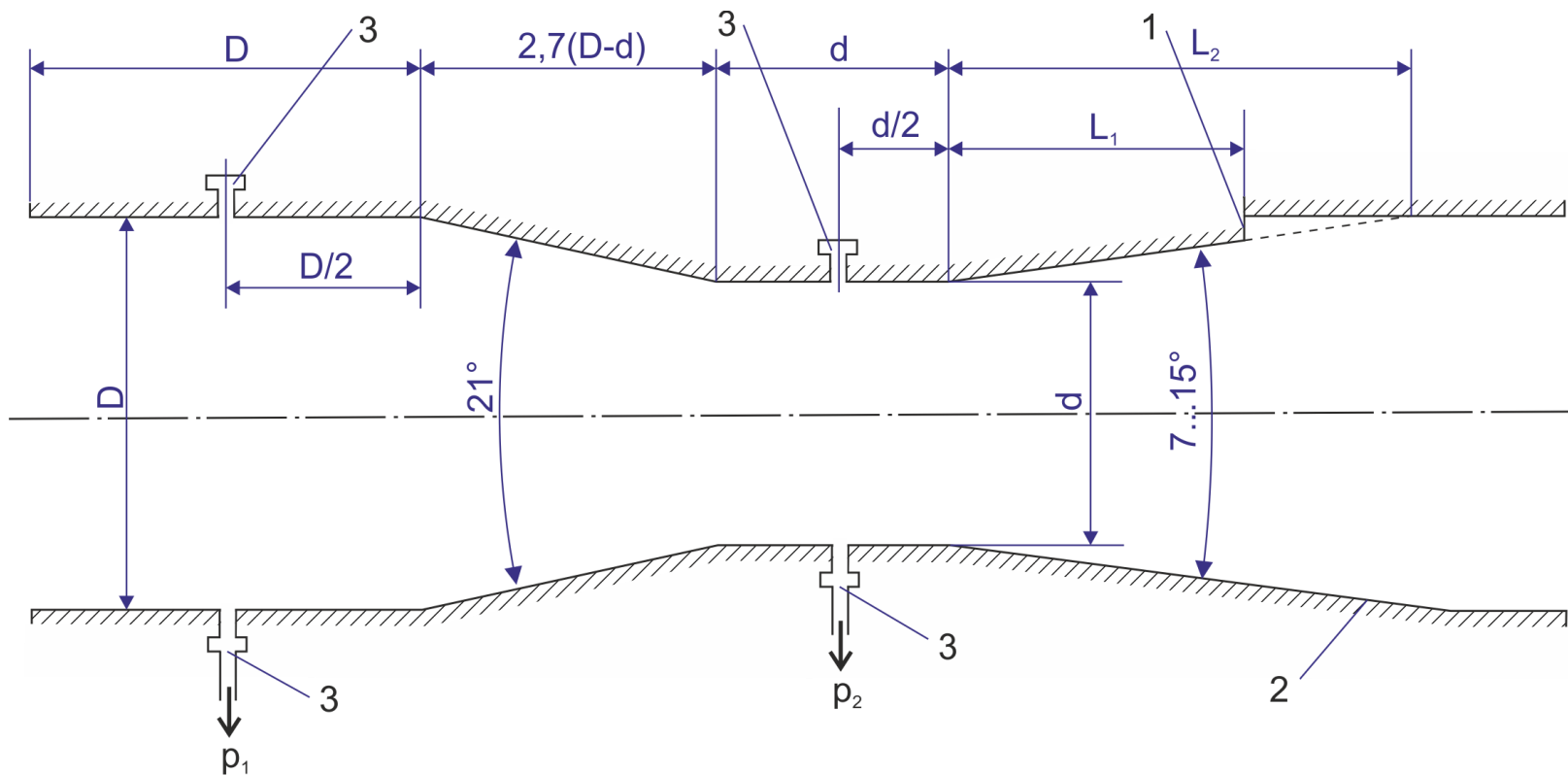
Düse



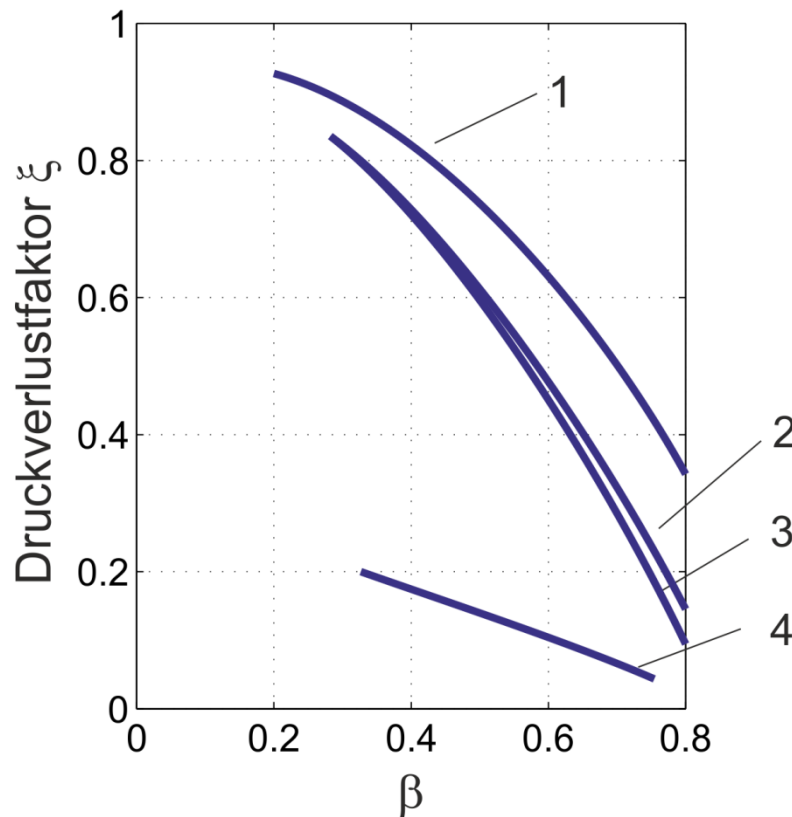
Venturidüse (kurz)



Venturirohr



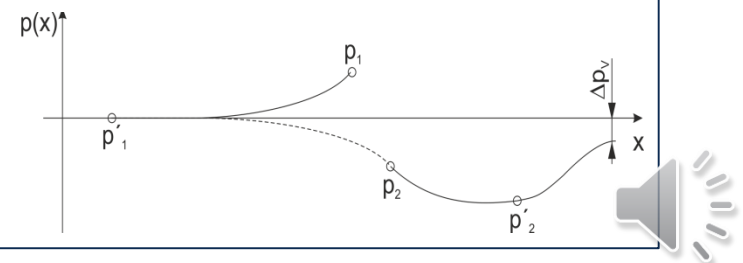
Druckverluste verschiedener Normdrosselgeräte



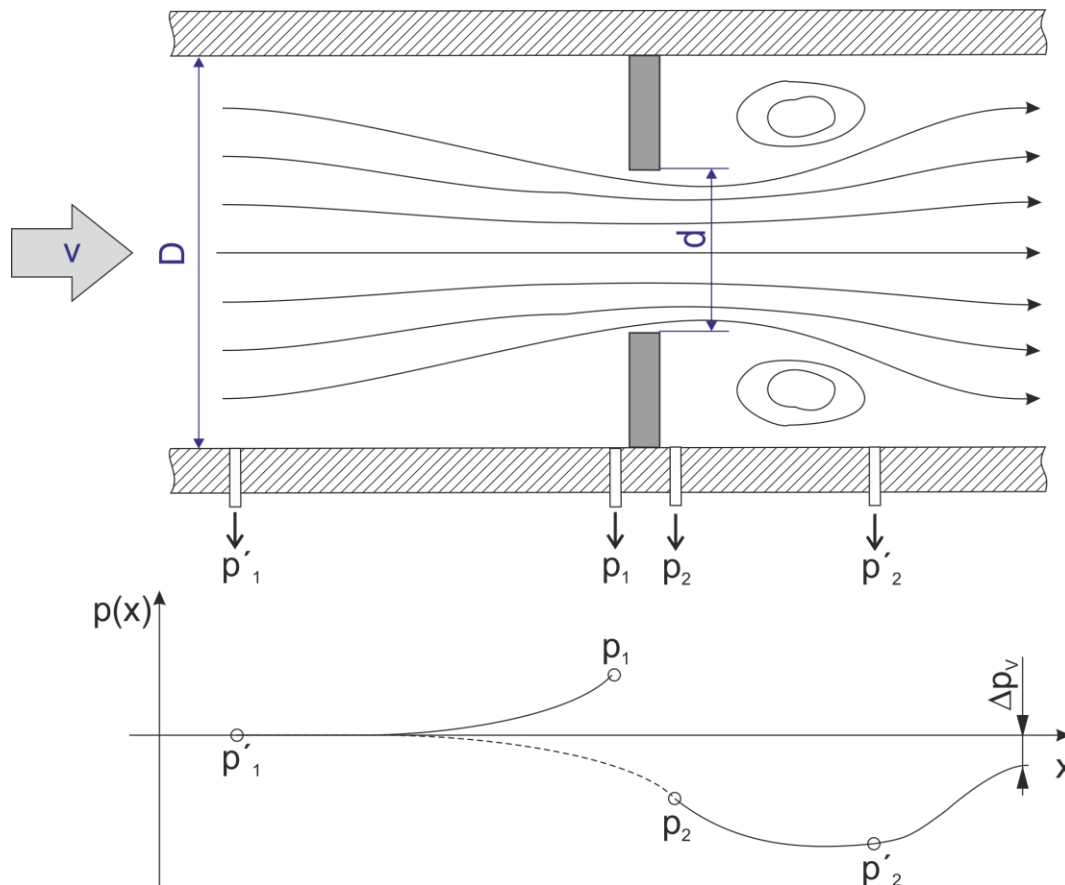
- 1 – Normblende
- 2 – kurze Normdüse
- 3 – lange Normdüse
- 4 – Normventuridüse

Dimensionsloser Druckverlustfaktor

$$\zeta = \frac{\Delta p_V}{p_1 - p_2} = \frac{\text{bleibender Druckverlust}}{\text{Wirkdruck}}$$



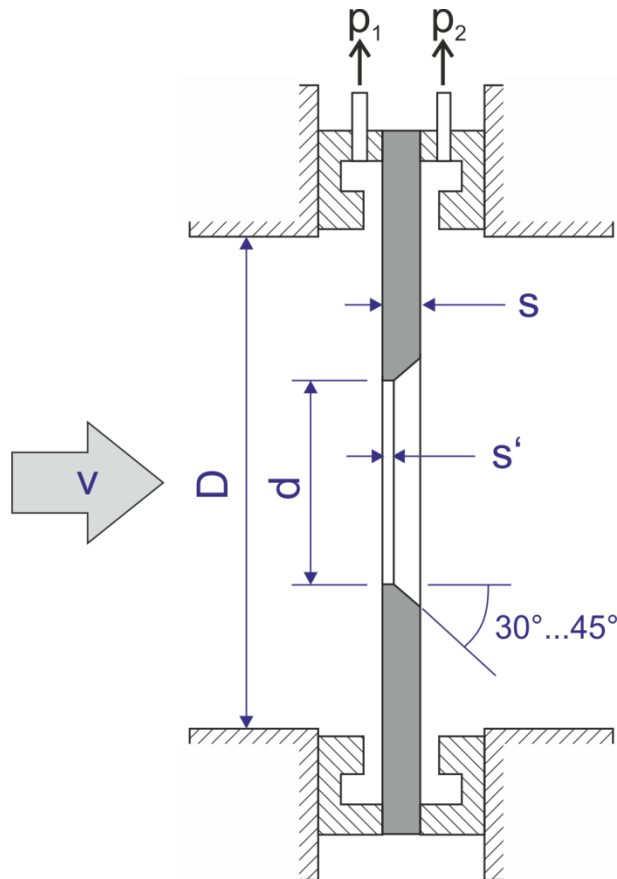
Druckverlauf an der Blende und Druckentnahmestellen



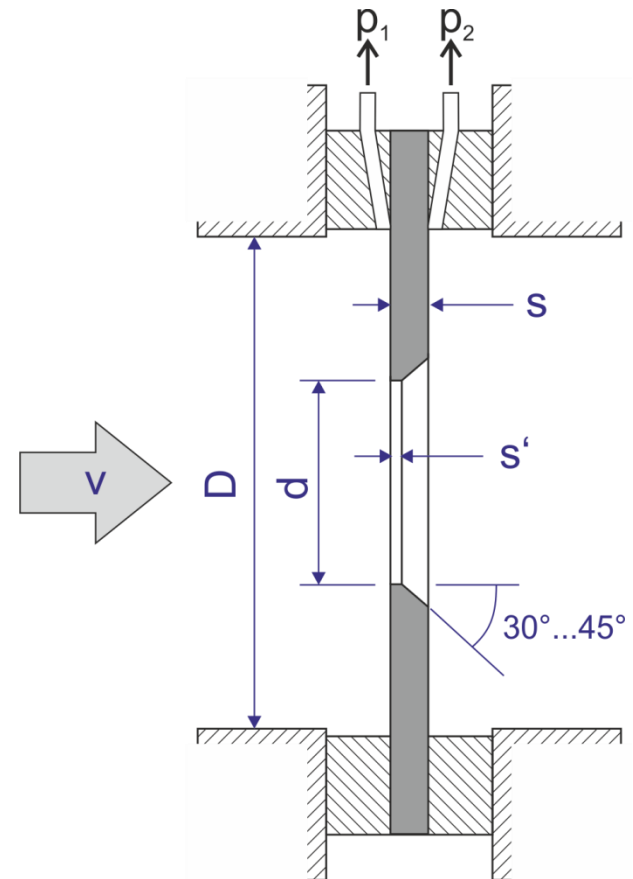
p_1', p_2' - $D - D/2$ - Entnahme
 p_1, p_2 - Eckdruckentnahme



Normblende mit Eckdruckentnahme



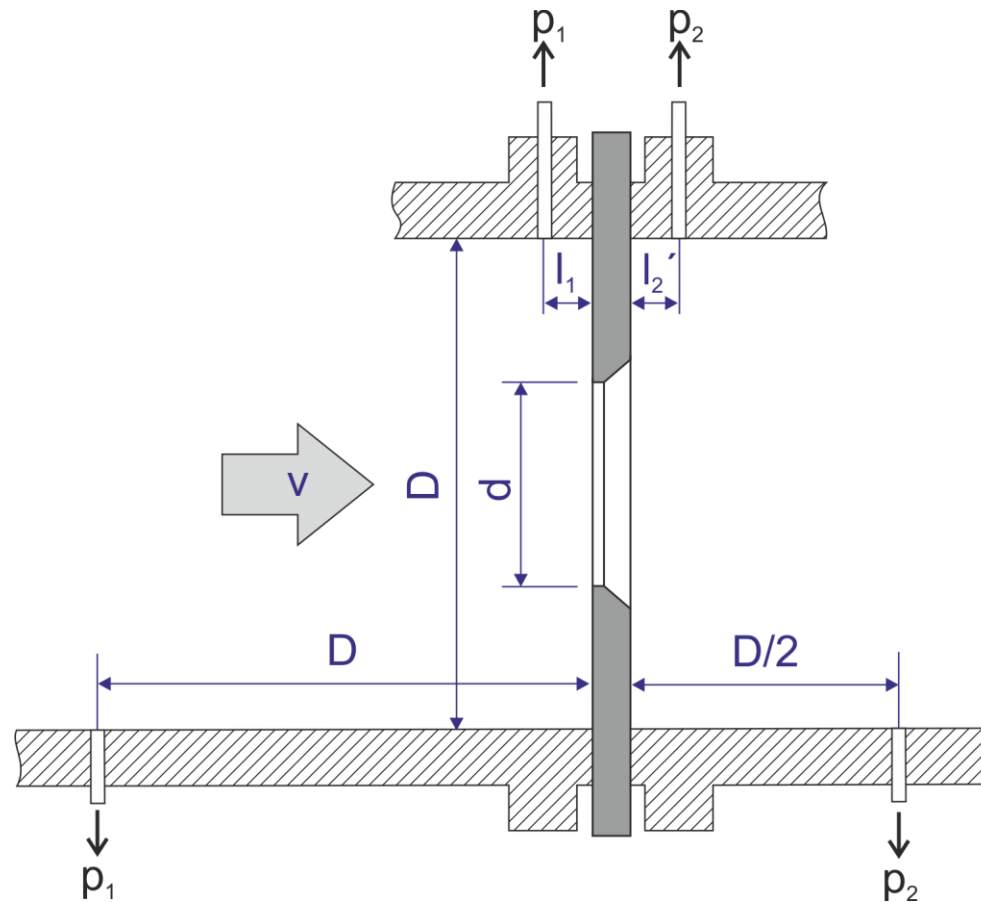
Blende mit Ringkammern



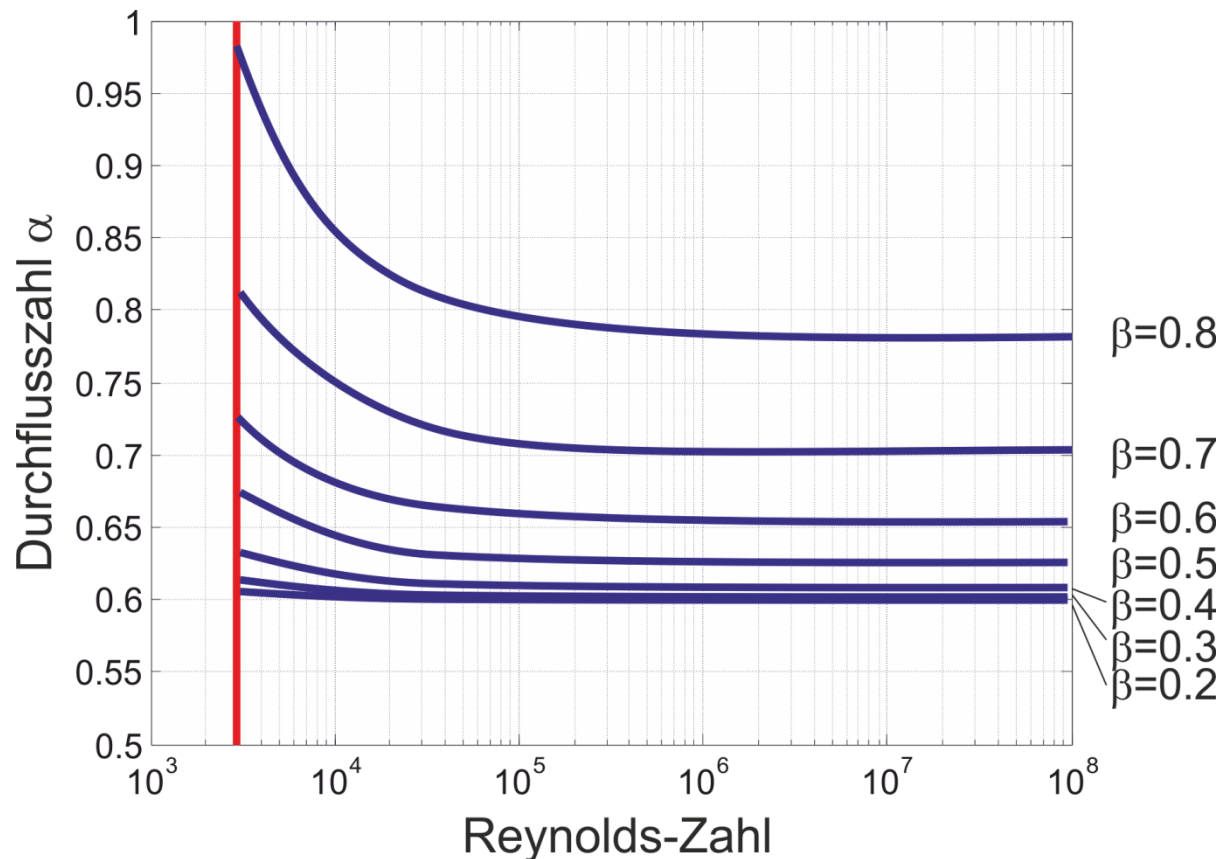
Blende mit Einzeldruckbohrungen



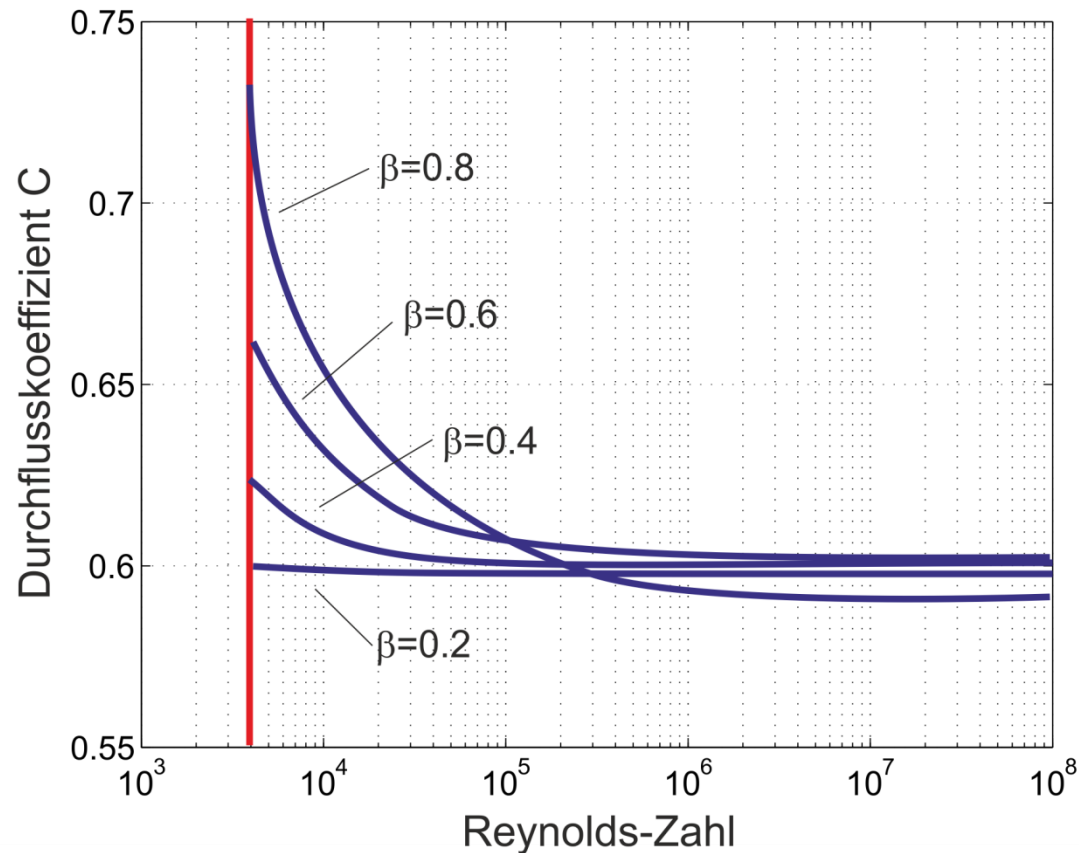
Normblende mit Flanschdruckentnahme



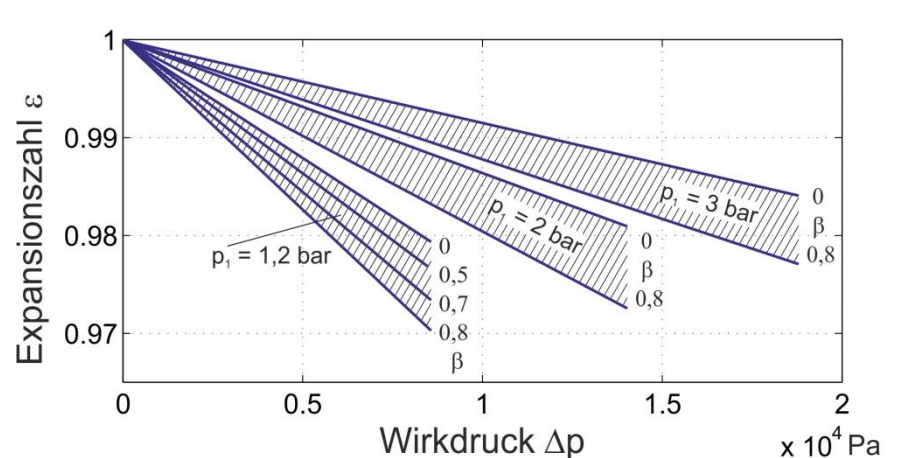
Durchflusszahl α einer Normblende mit Eckdruckentnahme



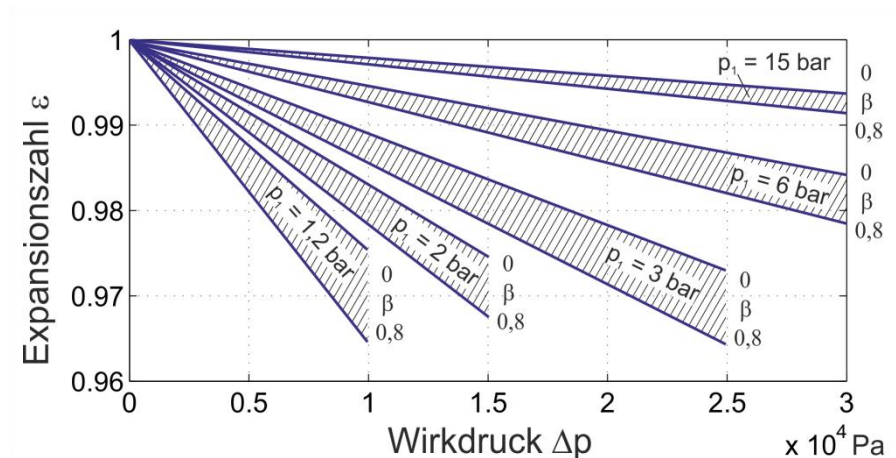
Durchflusskoeffizient C einer Normblende mit Eckdruckentnahme



Expansionszahl einer Normblende mit Eckdruckentnahme



Luft bzw. Industriegase
Adiabatindex $\kappa=1,38$

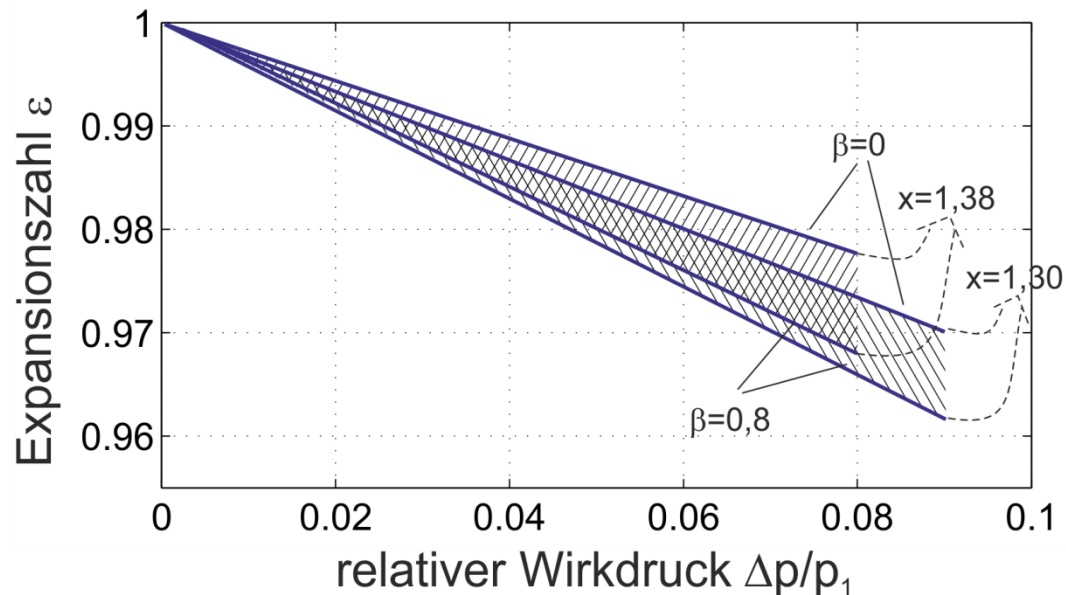


Heißdampf
Adiabatindex $\kappa=1,3$

Merke: für die Massestrommessung von Gasen und Dampf ist neben dem Differenzdruck auch der Absolutdruck p_2 hinter der Blende zu messen !



Expansionszahl einer Normblende mit Eckdruckentnahme



Luft bzw. Industriegase
Adiabatenindex $\kappa=1,38$

Heißdampf
Adiabatenindex $\kappa=1,3$



Vorzüge

- ✓ nach Normen gefertigt Geräte müssen nicht kalibriert werden
- ✓ preiswerte Technik (besonders Normblenden)
- ✓ prinzipiell unempfindlich gegen Verschmutzung und Korrosion (Ausfallsicherheit)
- ✓ geeignet für alle Nennweiten und Durchflussbereich
- ✓ keine beweglichen Teile

Kritische Punkte

- ✓ bleibender Druckverlust
- ✓ Empfindlichkeit gegenüber Änderungen des Strömungsprofils
- ✓ Materialabtragung und Verschmutzung führt zu Messfehlern, daher regelmäßige Wartung erforderlich (Kosten)

Normen:

DIN EN ISO 5167-1:2004

DIN EN ISO 5167-2:2004

