

Technische Strömungsmechanik M4 Formelsammlung

1 Kompressibilität K von Flüssigkeiten

$$\boxed{\frac{\Delta p}{E_{FL}} = -\frac{\Delta V}{V_0}} \quad K = \frac{1}{E_{FL}}$$

2 Kompressibilität von Gasen

$$\boxed{\frac{\Delta p}{p_0} = -\frac{\Delta V}{V_0}} \quad \text{Bei Gasen entspricht } p_0 = E_{Gas} \text{ für den Normzustand}$$

von $J_0 = 0^\circ C$; $p_0 = 1,01325 \text{ bar}$

3 Allgemeine Gasgleichung

$$\boxed{p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T} \quad \text{ist konstant bei gleichbleibender Temperatur}$$

p, V, m Druck, Volumen, Masse des Gases

R_i allgemeine Gaskonstante (Luft: $\sim 287,2 \frac{J}{kg \cdot K}$)

T Temperatur in Kelvin

auch in folgender Form:

$$\boxed{p \cdot u = R_i \cdot T \quad \text{mit } u = \frac{1}{r}}$$

r Dichte des Gases
 u spezifische Dichte des Gases

4 Viskosität von Fluiden

4.1 Dynamische Viskosität

$$\boxed{h = \frac{t}{dc_x/dz}} \quad [Pa \cdot s] \quad \text{vgl. UU9; auch } F = h \cdot A \cdot \frac{\Delta c_x}{\Delta z} \text{ vgl. 4.3}$$

$t = F/A$ Schubspannung, F ist Reibungskraft

4.2 Kinematische Viskosität

$$\boxed{n = \frac{h}{r}} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad \text{die sog. kinematische Viskosität ist anschaulich als } \mathbf{spezifische Viskosität} \text{ zu bezeichnen}$$

h Dynamische Viskosität

r Dichte des Mediums

4.3 Newtonsches Fluid-Reibungsgesetz

$$\boxed{t = h \cdot D = h \cdot \frac{\Delta c_x}{\Delta z}} \quad \text{vgl. UU9}$$

$t = F/A$ Schubspannung, F ist Reibungskraft

D Schergradient

h dynamische Viskosität siehe oben 4.1

4.4 Schallgeschwindigkeit a

4.4.1 Bei Flüssigkeiten

$$a = \sqrt{\frac{E_{FL}}{\rho_0}} \quad \left[\frac{m}{s}\right], \quad \text{gemäß } \frac{\Delta p}{\Delta r} = \frac{E_{FL}}{\rho_0};$$

4.4.2 Bei Gasen

$$a = \sqrt{k \cdot R_i \cdot T} \quad \left[\frac{m}{s}\right], \quad \text{gemäß } p \cdot v = R_i \cdot T$$

k Isentropenexponent (Luft: $\sim 1,4$) (maßlos)

R_i allgemeine Gaskonstante (Luft: $\sim 287,2 \frac{J}{kg \cdot K}$)

T Temperatur in Kelvin

5 Fluidstatik

5.1 Flüssigkeiten bei translatorischer Bewegung (vgl. U#4)

$$\tan a = \frac{a}{g}$$

5.2 Flüssigkeiten bei rotatorischer Bewegung (vgl. U#6)

$$z = \frac{w^2}{2g} \cdot r^2 + Z_s$$

z Funktion $z(r)$ der Oberfläche abhängig vom Radius r

w Winkelgeschwindigkeit des Behälters

Z_s Scheitelhöhe (tiefster Flüssigkeitsstand)

Volumengleichheit in einem Zylinder:

$$V_{Zyl.} = V_{Par(aboloid)} \quad (\text{Volumengleichheit bei Ruhe / Drehung})$$

$$\Rightarrow V_{Par.} = \int_0^R dV = p \frac{w^2}{g} \int_0^R r^3 dr + 2p \int_0^R r \cdot Z_s \cdot dr = p \cdot R^2 \left[\frac{w^2}{g} \cdot \frac{R^2}{4} + Z_s \right]$$

$$\Rightarrow h_1 = h_2 = \frac{w^2}{g} \cdot \frac{R^2}{4} \quad \begin{array}{l} Z_s = H_0 - h_1 \\ Z_R = H_0 + h_2 \end{array}$$

H_0 Einfüllhöhe der Flüssigkeit über dem Boden

h_1 / h_2 Distanz zwischen niedrigstem/höchstem Fl.-Stand und Einfüllhöhe H_0

R Innendurchmesser des Zylinders

sigkeit (nur für Boden/Decke, keine Wände)

$$F_z = p \cdot A_{proj.}$$

$A_{proj.}$ Projektionsfläche des zu betrachtenden Elements

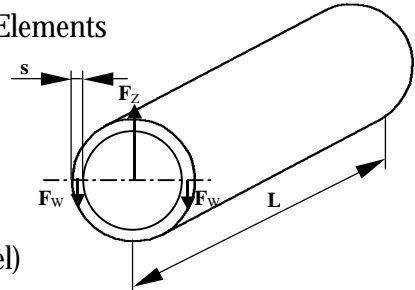
F_z resultierende Kraft auf dieses Element

Beispiel gemäß nebenstehender Abbildung:

1. $F_z - 2 \cdot F_w = 0$

2. $F_z = p \cdot A_{proj.} = p \cdot D \cdot L$

$\Rightarrow F_w = s_{zul.} \cdot s \cdot L$ (entsprechend Kesselformel)



6.2 Druck durch Gewichtskräfte

6.2.1 Druckverteilung in Flüssigkeiten (vgl. U#11)

$$p(z) = p_0 - \mathbf{r} \cdot g \cdot z$$

z läuft von unten nach oben! $z=0 \Rightarrow$ Flüssigkeitsgrund (Boden)

$$p(z) = p_B + \mathbf{r} \cdot g \cdot |z|$$

z läuft von oben nach unten! $z=0 \Rightarrow$ Flüssigkeitsoberfläche

p_B barometrischer Druck an der Oberfläche der Meßflüssigkeit

p_0 Druck am Ursprung des z -Koordinatensystems (normalerweise Boden)

z Laufvariable im Koordinatensystem

\mathbf{r} Dichte der Flüssigkeit

g Erdbeschleunigung

6.2.1.1 Prandtl-Manometer (vgl. U#13)

$$p_G = p_B + \mathbf{r}_{Fl} \cdot g \cdot \Delta z$$

p_G Gasdruck im zu messenden Medium

Δz Höhendifferenz zwischen linkem und rechtem Stand der Flüssigkeitssäule ($\Delta z = z_1 - z_2$)

6.2.1.2 Hydraulische Presse (vgl. U#15)

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

allgemein; Kreiskolben $\Rightarrow \frac{F_1}{D_1^2} = \frac{F_2}{D_2^2}$

$F_{1/2}$ Kraft auf Kolben 1 bzw. 2

$A_{1/2}, D_{1/2}$.. Fläche, Durchmesser des Kolbens 1 bzw. 2

6.2.1.3 Hydraulischer Heber (vgl. U#16)

$$\Delta p = \mathbf{r} \cdot g \cdot \Delta z$$

nur gültig solange $\Delta p < p_B$, ansonsten Vakuumbildung, z.B. erreicht bei normalem Luftdruck ab 10m Flüssigkeitssäule

Δp Druckdifferenz zwischen linker und rechter Seite

Δz Höhendifferenz zwischen linker und rechter Flüssigkeitsoberfläche

6.2.2 Fluidkräfte auf ebene Wände (vgl. U#17)

$$F = \mathbf{r} \cdot \mathbf{g} \cdot t_S \cdot A \quad \text{mit } t_S = \cos \mathbf{a} \cdot y_S$$

- F im Kraftangriffspunkt D auf die Wandung wirkende Kraft
 \mathbf{r} Dichte des Fluids
 g Erdbeschleunigung
 t_S Tiefe des Schwerpunktes der Wandung von der Fluidoberfläche aus
 \mathbf{a} Neigungswinkel der Wandung gegenüber der Normalen zur Oberfläche
 y_S Abstand des Schwerpunktes der **Wandung von der Fluidoberfläche im Koordinatensystem der Wandung**

Kraftangriffspunkt D:

$$x_D = \frac{I_{xy}}{y_S \cdot A}; \quad y_D = y_S + \frac{I_{S,x}}{A \cdot y_S}; \quad e = y_D - y_S = \frac{I_{S,x}}{y_S \cdot A}$$

- x_D, y_D Koordinaten des Kraftangriffspunkts D im KOS der Wandung
 I_{xy} Deviationsmoment der Wandung
 $I_{S,x}$ Flächenmoment 1. Grades bzgl. der x-Achse im Schwerpunkt S
 A Fläche der Wandung
 e Exzentrizität, Abstand von Schwerpunkt zu Kraftangriffspunkt

6.3 Hydrostatischer Auftrieb

$$F_a = \mathbf{r} \cdot \mathbf{g} \cdot V$$

- F_a Auftriebskraft
 \mathbf{r} Dichte des umgebenden Fluids
 g Erdbeschleunigung
 V Volumen des verdrängten Fluids (also nur das Volumen des eintauchenden Körpers, das unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche liegt)

6.4 Barometrische Höhenformel

$$p_0 = p_{b0} \cdot e^{-\left(\frac{r_{b0} \cdot g \cdot z}{p_{b0}}\right)}$$

nur gültig für $z < 1000m$, darüber isentrope Zustandsänderung verwenden gemäß Zusatzblätter von Prof. Dr. V. Schröder

mit $r_{b0} = 1,225 \frac{kg}{m^3}$; $p_{b0} = 1,01325bar$; $T_{b0} = 288,15K$

(atmosphärische Verhältnisse am Boden gemäß ICAO-Norm)

6.5 Aräometer

$$t = \frac{V}{\mathbf{p} \cdot r^2} \cdot \left(\frac{\mathbf{r}_0}{\mathbf{r}} - 1 \right)$$

- t Tiefe der Eichmarkierung
 V Volumen des Aräometers
 r Radius des Meßröhrchens des Aräometers
 \mathbf{r}_0 Dichte des Eichfluids
 \mathbf{r} Dichte des u messenden Fluids

7 Fluidynamik stationärer Strömungen

7.1 Laminare und turbulente Strömung

$$\text{Re} = \bar{c} \cdot \frac{D}{\nu} \quad (\text{Rohr})$$

D Rohrdurchmesser
 c Geschwindigkeit
 des
 Fluidteilchens

$$\text{Re} = c_{\infty} \cdot \frac{L}{\nu} \quad (\text{Platte, Tragflügel})$$

L Flügeltiefe
 c_{∞} Anströmge-
 schwindigkeit
 (relative Flügel-
 geschwindigkeit
 gegenüber den
 Fluidteilchen)

ν kinematische Viskosität
Re **Reynoldszahl**
 $\text{Re} < 2320 \Rightarrow$ laminare Strömung
 $\text{Re} > 2320 \Rightarrow$ turbulente Strömung

7.2 Durchflußgleichung (Kontinuitätsgleichung) eindimensionaler, stationärer

7.2.1 Definition des Volumenstroms

- für gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über dem Querschnitt gemäß U#26:

$$\Rightarrow \dot{V} = A \cdot \frac{ds}{dt}; \quad \text{falls } c \perp A \Rightarrow \dot{V} = A \cdot \bar{c}$$

\dot{V} Volumenstrom
 s, A, t Weg, Fläche, Zeit
 \bar{c} mittlere Geschwindigkeit der Fluidteilchen über den Querschnitt

- für **ungleichmäßige** Geschwindigkeitsverteilung über dem Querschnitt gemäß U#27:

$$\dot{V} = \int d\dot{V} = \int_A c(r) \cdot dA \quad \text{z.B. Kreisquerschnitt: } \dot{V} = 2\pi \int_0^R c(r) \cdot r \cdot dr$$

$c(r)$ integrierbare Funktion der Geschwindigkeitsverteilung der Fluidteilchen
 über den Querschnitt
 r Laufvariable über den Kreisquerschnitt von 0 (Mittelpunkt) bis R
 (Außenradius)

7.2.2 Definition des Massenstroms

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

\dot{m} Massenstrom
 ρ Dichte des Fluids

7.2.3 Kontinuitätsgleichung

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_i = 0$$

„Die Summe aller einströmenden und ausströmenden Massenströme ist Null.“

auch:

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot c_2 \cdot A_2$$

ρ_1, c_1, A_1 ..**Dichte, Geschwindigkeit, Fläche der** **Fluide**
 ρ_2, c_2, A_2 Dichte, Geschwindigkeit, Fläche der abfließenden Fluide

Im Fall inkompressibler Fluide verändert sich die Dichte ρ nicht. Damit vereinfacht sich obige Gleichung zur **Durchflußgleichung**:

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \Leftrightarrow c_1 \cdot A_1 = c_2 \cdot A_2 \quad \text{für inkompressible Fluide}$$

$\dot{V}_{1/2}$ zu-/abfließender Volumenstrom $\dot{V} = c \cdot A$

7.3 Bernoulli-Gleichung des ruhenden Systems

7.3.1 Bernoulli-Gleichungen ohne Berücksichtigung von Verlusten

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

spez. Druckenergie
 spez. Lageenergie
 spez. Geschwindigkeit

a) als Energiegleichung (durch Integration der Eulerschen Bewegungsgleichung)

$$p + \rho \cdot g \cdot z + \frac{\rho}{2} \cdot c^2 = C_1 = const.$$

statischer Druck
 geodätischer Druck
 dynamischer Druck

b) als Druckgleichung

zu statischer Druck und dynamischer Druck vgl. auch Prandtl-Staurohr 7.4.2

C, C_1, C_2Bernoullikonstanten

$$\frac{p}{\rho \cdot g} + z + \frac{c^2}{2g} = C_2 = const.$$

geodätischer Höhe
 Geschwindigkeitshöhe

c) als Höhengleichung

7.3.2 Erweiterte Bernoulli-Gleichungen unter Berücksichtigung von Verlusten

a) als Energiegleichung:
$$\frac{p_1}{\rho} + g \cdot z_1 + \frac{c_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + g \cdot z_2 + \frac{c_2^2}{2} + Y_{V_{1-2}}$$

$Y_{V_{1-2}}$ spezifische Verlustenergie zwischen Punkt 1 und 2

b) als Druckgleichung:
$$p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1 + \frac{\rho}{2} \cdot c_1^2 = p_2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + \frac{\rho}{2} \cdot c_2^2 + p_{V_{1-2}}$$

$p_{V_{1-2}}$ Druckverlust zwischen Punkt 1 und 2

c) als Höhengleichung:
$$\frac{p_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{c_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{c_2^2}{2g} + H_{V_{1-2}}$$
 $Y_{V_{1-2}} = \frac{p_{V_{1-2}}}{\rho} = H_{V_{1-2}} \cdot g$

$H_{V_{1-2}}$ Verlusthöhe zwischen Punkt 1 und 2

7.3.3 Gültigkeit der Bernoulli-Gleichungen

Die Bernoulli-Gleichung **gilt exakt** grundsätzlich nur **entlang einer Stromlinie** bei **stationärer** Strömung eines **idealen** Fluids, d.h. die Bernoullikonstante ist nur dieser Stromlinie entlang konstant.

Für den Sonderfall **paralleler Stromlinien** und **homogener** Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt senkrecht zur Strömungsrichtung ist die Bernoulli-Gleichung **allgemeingültig**, d.h. die Bernoullikonstante ist **über** den gesamten **Querschnitt** für jede Stromlinie gleich und konstant.

Für den Sonderfall einer Strömung entlang einer gekrümmten Bahn muß die Druckänderung dp_n über den Querschnitt berücksichtigt werden.

7.4 Folgerungen aus der Bernoulli-Gleichung für ruhende Systeme

7.4.1 Torricellische Ausflußgleichung (vgl. U#34)

(siehe auch 7.8.3 unten: Ausfluß aus Behältern)

$$\overline{c_2} = \sqrt{2 \cdot (g \cdot \Delta z - Y_{V_{1-2}})} \quad \text{Annahme: } p_1 = p_2 = p_B \text{ und } \overline{c_1} \approx 0 \text{ bei großem Querschnitt } A_1$$

$Y_{V_{1-2}}$ spezifische Verlustenergie zwischen Punkt 1 und 2

Δz Höhendifferenz zwischen Punkt 1 und 2

7.4.2 Prandtl-Staurohr / umströmtes Profil (vgl. U#36f)

Grundsatz **für umströmte Profile: die Gesamtenergie und damit der Gesamtdruck ändert sich entlang einer Stromlinie nicht!**

$$p_g = p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot c_1^2 \quad \text{oder} \quad p_g = p_{st} + p_{dyn} \quad \text{Annahme: } z_1 = z_2 \text{ (horizontal); } c_2 = 0 \text{ (im Staupunkt)}$$

$p_g = p_2$ Gesamtdruck

$p_{st} = p_1$ statischer Druck

$p_{dyn} = \frac{\rho}{2} c_1^2$ dynamischer Druck

7.4.3 Horizontaler, gerader Diffusor (vgl. U#39)

$$p_2' = p_1 + r \cdot \frac{c_1^2}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] \quad (\text{rein theoretisch) ohne Verluste}$$

REALITÄT: VERLUSTBEHAFTETER DIFFUSOR MIT WIRKUNGSGRAD h_D

$$h_D = \frac{p_2 - p_1}{p_2' - p_1} \quad \text{sehr guter Diffusor mit sehr kleinen Neigungswinkeln: } h_D \approx 0,95$$

p_1 tatsächlicher (realer) Druck vor dem Diffusor

p_2 tatsächlicher (realer) Druck nach dem Diffusor

p_2' theoretischer Druck (ohne Verluste, vgl. oben) nach Durchströmen des Diffusors

$$p_{V_{1-2}} = p_2' - p_2$$

$$p_{V_{1-2}} = (1 - h_D) \cdot \frac{r}{2} \cdot c_1^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] \quad \text{Druckverlust beim realen (verlustbehaftetem) Diffusor}$$

GESCHWINDIGKEITSERHÖHUNG DURCH DEN KONFUSOR: (VGL. U#40/42)

$$c_2 = \sqrt{c_1^2 + 2 \cdot \frac{p_1 - p_2'}{r}} \quad (\text{ohne Verluste; mit Verlusten: } p_2' \text{ durch } p_2 \text{ ersetzen})$$

7.4.4 Pitot-Rohr (vgl. U#42)

$$c = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad \text{nur für offene Flüssigkeitssysteme und offenes Rohr}$$

h Höhe der Flüssigkeitssäule im Pitot-Rohr

7.5 Druckänderung normal zu Stromlinien (z.B. bei gekrümmter Bahn)

$$dp_n = r \cdot \frac{c^2}{r} \cdot dn \quad (\text{vgl. U#31) (Näherungsformel, gute Näherung nur bei Betrachtungen en gesamten Querschnitt)$$

dp_n Druckänderung über den Querschnitt Strömungsrichtung

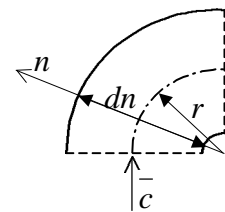
dn Länge des betrachteten Querschnitts

\bar{c} mittlere Geschwindigkeit im Bereich des betrachteten Querschnitts

r mittlerer Radius des betrachteten Querschnitts

r Dichte des Fluids

dn normal zur



Potentialwirbel: (vgl. U#51)

$$dp_n = -r \cdot c \cdot dc \Rightarrow r_1 \cdot c_1 = r_2 \cdot c_2 = konst.$$

damit:

$$p(r) = p_0 + \frac{r}{2} \cdot c_0^2 \cdot \left[1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right]$$

Merke: in einem *ungekrümmten* durchflossenen Volumen ist (bei stationärer Strömung) der *statische* Druck über der Querschnittsfläche konstant, auch bei abgelöster Strömung und unterschiedlichen Geschwindigkeiten über diesem Querschnitt (Einschnürung).

7.6 Bernoulli-Gleichung des rotierenden Systems

$$\frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} - \frac{u^2}{2} + g \cdot z = \text{konst.}$$

Energiegleichung ohne Verluste (mit Verlusten bzw. andere Gleichungsformen entsprechend 7.3)

$u = \mathbf{w} \cdot \mathbf{r}$ Umfangsgeschwindigkeit bei Winkelgeschwindigkeit \mathbf{w} und Radius r des Absolutsystems

w Relativgeschwindigkeit des Fluidteilchens zum rotierenden System (normalerweise tangential zur Stromlinie)

p, ρ, z Druck, Dichte und Höhe des Fluids

Druckänderung an Turbinenschaufeln allgemein (vgl. Zusatzblätter)

Sonderfall: gerade Turbinenschaufeln (vgl. U#54):

$$w = w' + 2 \cdot \mathbf{w} \cdot \Delta \mathbf{n}$$

7.7 Impulssatz (vgl. U#55)

7.7.1 Integration über Kontrollvolumen

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_{fi} = \dot{m} \cdot (\vec{c}_2 - \vec{c}_1)$$

Vektorgleichung! Vorzeichen gemäß Koordinatensystem!

$\sum_{i=1}^n \vec{F}_{fi}$ Summe aller angreifenden Impulskräfte

\dot{m} Massenstrom durch das Volumenelement

\vec{c}_2 Summe aller abfließenden Stromgeschwindigkeiten

\vec{c}_1 Summe aller zufließenden Stromgeschwindigkeiten

7.7.2 Unbestimmte Integration („Impulspotential“)

$$\vec{F}_{fi} = \dot{m} \cdot \vec{c}_i$$

Grundsätzlich: Druck- und Impulskräfte zeigen immer in den Kontrollraum hinein!

Vorzeichenregel: 1. am Eintritt in Kontrollvolumen \vec{F}_{f1} in $\vec{c}_{(1)}$ -Richtung

2. am Austritt entgegen $\vec{c}_{(2)}$ -Richtung

7.8 Folgerungen aus dem Impulssatz

7.8.1 Kräftegleichgewicht

$$\dot{m} \cdot (\vec{c}_2 - \vec{c}_1) = \sum_{k=1}^m \vec{F}_{Sk}$$

nur gültig für stationären Fall (ohne Beschleunigung)

$\dot{m} \cdot (\vec{c}_2 - \vec{c}_1) \equiv \sum_{j=1}^n \vec{F}_{fj}$ Summe aller Impulskräfte am Kontrollraum

$\sum_{k=1}^m \vec{F}_{Sk}$ Summe aller sonstigen angreifenden Kräfte am Kontrollraum

7.8.2 Schiefer Stoß gegen feststehende Wand (vgl. U#57)

$$F_w = \rho \cdot A_D \cdot c_D^2 \cdot \sin \mathbf{d}$$

nur für Anordnung gemäß U#57

$$\dot{V}_2 = \frac{1}{2} \cdot \dot{V}_1 \cdot (1 - \cos \mathbf{d})$$

$$\dot{V}_3 = \frac{1}{2} \cdot \dot{V}_1 \cdot (1 + \cos \mathbf{d})$$

Sonderfall: $\mathbf{d} = 90^\circ$, damit: $\dot{V}_2 = \dot{V}_3 = \frac{1}{2} \cdot \dot{V}_1$

7.8.3 Ausfluß aus Behältern ins Freie (vgl. U#59, Bordamündung)

(Siehe 7.4.1 oben: Torricellische Ausflußgleichung)

$$a = \frac{A_e}{A_i}$$

Kontraktionszahl

A_e Querschnittsfläche des tatsächlichen Ausflußstroms (Einschnürung,

A_i Querschnittsfläche des Eintrittsstroms

Beispiele: - scharfkantiges Loch, kreisförmig: $\alpha=0,58$

- scharfkantiges Loch, rechteckig: $\alpha=0,61$

- Bordamündung, scharfkantig: $\alpha=0,5$

- abgerundete Düse: $\alpha \approx 1$

8 Rohrströmungen

8.1 Laminare Rohrströmung $Re < 2320$

8.1.1 Geschwindigkeitsverteilung

$$c(r) = \frac{\Delta p}{4 \cdot h \cdot L} \cdot (R^2 - r^2)$$

$$c_{\max} = \frac{\Delta p}{4 \cdot h \cdot L} \cdot R^2$$

$$\bar{c} = \frac{1}{2} \cdot c_{\max}$$

h dynamische Viskosität (siehe 4.1 oben)

L Länge des Rohrstücks

Δp statische Druckdifferenz

R Rohrdurchmesser

r Laufvariable über den Querschnitt

\bar{c} mittlere Geschwindigkeit über dem Querschnitt

8.1.2 Volumenstrom

$$\dot{V} = 2 \cdot p \cdot \frac{\Delta p}{h \cdot L} \cdot R^4$$

(Bezeichnungen wie bei Geschwindigkeitsverteilung 8.1.1 oben)

8.1.3 Verluste

$$Y_v = I \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \frac{c^2}{2}$$

mit $I = \frac{64}{Re}$ damit: $Z = I \cdot \frac{L}{D}$ (**ROHRVERLUSTZIFFER**)

I Rohrreibungszahl, zu bestimmen nach Blättern im Umdruck

Re Reynoldszahl (siehe 7.1 oben)

8.1.4 Schubspannung an der Rohrwand

$$t_0 = \frac{I}{8} \cdot r \cdot c^2$$

8.2 Turbulente Rohrströmung

vgl. Z 5.2.6.2.1 und U#71ff

Berechnung nach Diagramm Seite 11 oder folgende Formeln

8.2.1 Hydraulisch glattes Verhalten

$$I = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad \text{für } 2320 < Re < 10^5 \text{ (nur Rohrquerschnitt) nach Blasius}$$

$$\text{bzw. } I = \frac{0,2236}{\sqrt[4]{Re}} \quad \text{nur für Kreisring}$$

$$I = 0,0032 + 0,221 \cdot Re^{-0,237} \quad \text{für } 10^5 < Re < 10^8 \text{ nach Nikuradse}$$

universell für $Re > 2320$:

$$\frac{1}{\sqrt{I}} = 2 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{I}) - 0,8 \quad \text{nach Prandtl-Colebrook}$$

8.2.2 Mischgebiet ($25 < \frac{k_s}{D} \cdot Re^{0,875} < 350$)

$$\frac{1}{\sqrt{I}} = -2 \cdot \log\left(\frac{2,51}{\sqrt{I} \cdot Re} + 0,27 \cdot \frac{k_s}{D}\right) \quad k_s \text{ laut Angabe oder Z 5.2.6.2.1}$$

8.2.3 Rauhes Verhalten ($\frac{k_s}{D} \cdot Re^{0,875} \geq 350$)

$$I = \frac{1}{\left[1,14 - 2 \cdot \log\left(\frac{k_s}{D}\right)\right]^2} \quad k_s \text{ laut Angabe oder Z 5.2.6.2.1}$$

8.3 Hydraulischer Durchmesser (vgl. U#73)

$$d_{hyd.} = \frac{4 \cdot A_{UR}}{U_{ges}} \quad \text{Ersatzdurchmesser bei unrundem Querschnitt}$$

A_{UR} Fläche der Durchflußöffnung des unrunder durchflossenen Profils

U_{ges} Umfang (*Längenmaß!*) der vom Fluid benetzten Fläche (ggf. innen und

8.3.1 Hydraulischer Durchmesser am Ringspalt (vgl. U#74)

$$d_{hyd.} = 2 \cdot s \quad s \text{ Spaltweite}$$

8.3.2 Hydraulischer Durchmesser am Rechteckkanal (vgl. U#75)

$$d_{hyd.} = 2 \cdot \frac{b \cdot h}{b + h} \quad b, h \text{ Breite, Höhe des Rechteckkanals}$$

8.3.3 Hydraulischer Durchmesser am freien (offenen) Rechteckkanal (vgl. U#76)

$$d_{hyd.} = 2 \cdot \frac{b \cdot h}{h + 0,5b} \quad b, h \text{ Breite, Höhe des Rechteckkanals}$$

9 Sonstiges Wissenswertes

9.1 Verlustziffer Zeta (z)

9.1.1 Grundsätzlich

$$Y_{V_{1-2}} = z \cdot \frac{c^2}{2} \quad \text{oder} \quad \frac{E_{kin1}}{m_1} \cdot (1-z) = \frac{E_{kin2}}{m_2}$$

ζ ist das Maß für den Verlust an spezifischer kinetischer Energie bezogen auf die spezifische Energie bei Geschwindigkeit c

$Y_{V_{1-2}}$ spezifische Verlustenergie zwischen 1 und 2

$\frac{E_{kin1}}{m_1}$ spezifische kinetische Energie am Punkt 1 ($= \frac{c_1^2}{2}$)

9.1.2 Verlustziffer einer plötzlichen Erweiterung (vgl. U#62)

$$z_1 = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad \text{Bezogen auf spezifische kinetische Energie bei } \mathbf{c}_1: Y_{V_{1-2}} = z_1 \cdot \frac{c_1^2}{2}$$

$$z_2 = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1\right)^2 \quad \text{Bezogen auf spezifische kinetische Energie bei } \mathbf{c}_2: Y_{V_{1-2}} = z_2 \cdot \frac{c_2^2}{2}$$

Sonderfall: $A_1 \ll A_2$ (Austritt) $\Rightarrow z_{Aus} = 1$ (die ganze kinetische Energie geht also verloren)

9.1.3 Verlustziffer bei einer plötzlichen Verengung (vgl. U#63)

Die Verluste entstehen vor allem durch die Einschnürung und Strömungsablösung bei \rightarrow , die Verlustenergie zwischen \leftarrow und \uparrow ist also die gleiche wie zwischen \rightarrow und \uparrow .

$$z_1 = \left(\frac{1}{a} - 1\right)^2 \cdot \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 \quad \text{Bezogen auf spezifische kinetische Energie bei } \mathbf{c}_1: Y_{V_{3-2}} = z_1 \cdot \frac{c_1^2}{2}$$

A_1 Querschnittsfläche vor der Verengung am Punkt \leftarrow

A_2 Querschnittsfläche am Ende der Verengung am Punkt \uparrow

$$z_2 = \left(\frac{1}{a} - 1\right)^2 \quad \text{Bezogen auf spezifische kinetische Energie bei } \mathbf{c}_2: Y_{V_{3-2}} = z_2 \cdot \frac{c_2^2}{2}$$

a Kontraktionszahl (siehe auch 7.8.3 oben (Beispiele)) exakt: $a = A_3 / A_2$;
aber A_3 unbekannt, deshalb Bestimmung von a durch Versuche abhängig von A_2 / A_1 .

Sonderfall: $A_1 \gg A_2$ (Eintritt) $\Rightarrow a = 0,58 \Rightarrow z_{Ein} = 0,52 \approx 0,5$

9.2 Winkelgeschwindigkeit

$$\mathbf{w} = 2 \cdot \mathbf{p} \cdot \mathbf{n} \quad \text{mit Einheiten oder: Zahlenwertgleichung: } n = \frac{\mathbf{w}}{2\mathbf{p}} \cdot 60 [\text{min}^{-1}] \text{ für } [\mathbf{w}] = [\text{s}^{-1}]$$

9.3 Einheitenumrechnungen

Druck: $1 \text{ bar} = 100000 \text{ Pa} = 100000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 0,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Beschleunigung: $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} = 1 \frac{\text{N}}{\text{kg}}$

Kraft: $1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$

Leistung $1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$

Energie/Arbeit: $1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$

10 Vereinbarungen, verwendete Abkürzungen

U#32f..... Umdruck Abbildung Nummer 32 und folgende
Z..... Zusatzblätter
KOS..... Koordinatensystem
ggf..... gegebenenfalls

11 Stichwortverzeichnis

Abkürzungen.....	13	Kräfte	
Aräometer.....	4	Angriffspunkt.....	4
Auftrieb.....	4	auf ebene Wände.....	4
Ausfluß aus Behältern.....	10	Lageenergie.....	<i>Vgl. Bernoulli-Gleichung</i>
Ausflußgleichung.....	7	Massenstrom.....	5
Bernoulli-Gleichung		Newtonsches Fluid-Reibungsgesetz.....	1
des rotierenden Systems.....	9	Normalendruckänderung.....	8
des ruhenden Systems.....	6	Pitot-Rohr.....	8
erweiterte, mit Verlusten.....	7	plötzliche Erweiterung.....	12
Folgerungen.....	7	plötzliche Verengung.....	12
Bordamündung.....	10	Prandtl	
Diffusor.....	8	-Manometer.....	3
Drehzahl.....	12	-Staurohr.....	7
Druck		Presse, hydraulische.....	3
auf gekrümmte Flächen.....	3	Reynoldszahl.....	5
durch Gewichtskräfte.....	3	Rohrströmung	
dynamischer.....	<i>Vgl. Bernoulli-Gleichung</i>	laminare.....	10
Fluid-Druck.....	3	Rohrverlustziffer.....	10
geodätischer.....	<i>Vgl. Bernoulli-Gleichung</i>	turbulente.....	10
-gleichung.....	<i>Vgl. Bernoulli-Gleichung</i>	Rotatorischer Bewegung.....	2
-höhe.....	<i>Vgl. Bernoulli-Gleichung</i>	Schallgeschwindigkeit.....	2
statischer.....	8	Schiefer Stoß.....	9
-verteilung.....	3	Stationäre Strömungen.....	5
Druckänderung über Querschnitt.....	8	Staurohr.....	7
Durchflußgleichung.....	6	Strömung	
Einheit.....	12	laminare.....	5
Energiegleichung.....	<i>Vgl. Bernoulli-Gleichung</i>	turbulente.....	5
Fluiddynamik.....	5	Torricelli.....	7
Fluidkräfte.....	<i>Siehe Kräfte</i>	Translatorische Bewegung.....	2
Fluidstatik.....	2	Turbinenschaufeln.....	9
Gasgleichung.....	1	Umrechnung	
Gaskonstante.....	1, 2	Einheiten.....	12
geodätische.....	<i>Vgl. Bernoulli-Gleichung</i>	Winkelgeschwindigkeit in Drehzahl.....	12
Gesamtdruck.....	7	Verlustziffer.....	12
Geschwindigkeitsenergie.....	<i>Vgl. Bernoulli-Gleichung</i>	des Rohres.....	10
Geschwindigkeitshöhe.....	<i>Vgl. Bernoulli-Gleichung</i>	Viskosität	
Heber, hydraulischer.....	3	dynamische.....	1
Höhenformel.....	4	kinematische.....	1
Höhengleichung.....	<i>Vgl. Bernoulli-Gleichung</i>	von Fluiden.....	1
Hydraulischer Durchmesser.....	11	Volumengleichheit	
Impulsatz.....	9	Zylinderrotation.....	2
Kompressibilität		Volumenstrom.....	5
von Flüssigkeiten.....	1	Winkelgeschwindigkeit.....	12
von Gasen.....	1	Wirkungsgrad	
Konfusor.....	8	des Diffusors.....	8
Kontinuitätsgleichung.....	6	Zähigkeit.....	<i>Siehe Viskosität</i>
Kontraktionszahl.....	10	Zeta (z).....	<i>Siehe Verlustziffer</i>