

Strömungsmechanik

1	STRÖMUNGSMECHANIK.....	3
1.1	LINIENKONZEPT	3
1.1.1	Steichlinie von A	3
1.1.2	Pladlinie von A	3
1.1.3	Stromlinien	3
1.2	VOLUMENSTROM, MASSENSTROM	3
1.2.1	Volumenstrom	3
1.2.1.1	Volumenstrom durch eine schräge Fläche	3
1.2.2	Massenstrom	3
1.2.3	Kontinuitätsgleichung	3
1.2.3.1	inkompressible Strömung (konstanter Dichte)	3
1.2.4	Machzahl	3
1.3	STRÖMUNGEN	3
1.3.1	Ideales Fluid	3
1.3.1.1	Ideales Fluid Gas Bedingung	3
1.3.2	Reales Fluid, laminare Strömung	4
1.3.3	Reales Fluid, turbulente Strömung	4
1.3.4	Reynoldszahl	4
1.3.4.1	Hydraulischer Durchmesser	4
1.3.4.2	Rohr	4
1.3.4.3	Platte	4
1.3.4.4	Zylinder	4
1.3.5	Ablösung	4
1.3.5.1	Laminar	4
1.3.5.2	Turbulent	4
1.4	FLUIDSTATIK	4
1.4.1	Druck	4
1.4.2	Hydrostatisches Gesetz	4
1.4.3	Krümmungsdruckformel (gilt nur bei Reibungsfreiheit)	4
1.4.3.1	Krümmungsdruckformel mit Gewichtskraft	5
1.5	BERNOULLI	5
1.5.1	Bernoulligleichung	5
1.5.1.1	Bilanzierung	5
1.5.1.2	Energiegleichung	5
1.5.1.3	Druckgleichung	5
1.5.1.4	Höhengleichung	5
1.5.2	Verluste	5
1.5.3	Spezifische Stutzenarbeit Y	5
1.5.3.1	Hydraulische Leistung	5
1.6	IMPULSSATZ UND DRALLSATZ FÜR STATIONÄRE STRÖMUNG	6
1.6.1	Energiestrom	6
1.6.2	Impulsstanz	6
1.6.2.1	Impulsstrom	6
1.6.3	Drallsatz	6
1.6.3.1	Drallstrom	6
1.6.4	Triebwerk	6
1.6.4.1	Schubkraft eines Triebwerks	6
1.6.4.2	Schubleistung eines Triebwerks	6
1.6.5	Vereinfachte Propellertheorie	6
1.6.5.1	Vortriebswirkungsgrad	7
1.7	RÄUMLICHE, REIBUNGSFREIE STRÖMUNGEN	7
1.7.1	Festkörperrotation (eigentlich keine Strömung)	7
1.7.2	Quell- und Senkenströmungen	7
1.7.3	Potentialwirbel	7
1.7.4	Wirbelsenke (Abfluss, Potentialwirbel + Senke)	7
1.7.5	Rotation	7
1.7.5.1	3D-Rotation	7
1.8	REIBUNGSGESETZ	8
1.8.1	Dynamische Viskosität	8
1.8.1.1	Fluidarten	8
1.8.2	Kinematische Viskosität	8
1.8.3	Reibkraft	8
1.8.4	Reibleistung	8
1.8.5	Bewegungsgleichung	8
1.8.5.1	Reibungsfrei	8
1.8.5.2	Reibungsbehaftet	8
1.8.6	Strömungen in Lagern und Spalten	8
1.8.6.1	2x integriert	8
1.9	GRENZSCHICHT	9
1.9.1	Verdrängungsdicke	9
1.9.2	Impulsungeldicke	9
1.10	ROHRSTRÖMUNG	9
1.10.1	Laminar	9
1.10.2	Turbulent	9
1.10.3	Colebrook	9
1.10.3.1	Laminar	9
1.10.3.2	Turbulent, rau	9
1.10.3.3	Turbulent, Übergang	9
1.10.3.4	Turbulent, glatt	9
1.10.4	Rohrleitungsverluste	10
1.11	ROHRLEITUNGSEINBAUTEN	10
1.11.1	Diffusor	10
1.11.1.1	Diffusorwirkungsgrad	10
1.11.2	Trennung (Leistungsbilanz mit Bernoulli)	10
1.11.3	Rohrleitungselementverluste	10
1.11.3.1	Verlustleistung	10
1.11.4	Verlustrücken	11
1.11.5	Verluste	11
1.11.5.1	Kavitation, NPSH	11
1.11.6	Pumpen	11
1.11.6.1	Parallelschaltung	11
1.11.6.2	Serieschaltung	11
1.11.6.3	Pumpenleistung	11
1.11.6.4	Radialpumpen	11
1.11.6.5	Axialpumpen	11
1.11.6.6	Spezifische Drehzahl	11
1.11.6.7	Bypassregelung	12
1.11.6.8	Drosselung	12
1.11.6.9	Drehzahlregelung	12
1.11.6.10	Anpassung der Kennlinien an Betriebsdaten durch Abdrehen oder Zuspitzen	12
1.11.7	Blende	12
1.12	ÖLHYDRAULIK	13
1.12.1	Hydraulik	13
1.12.1.1	Hydraulische Kraftübertragung (1 Flüssigkeitsraum)	13
1.12.1.2	Hydraulische Druckübersetzung (2 Flüssigkeitsräume)	13
1.12.2	Kompressibilität (Bulk-Modul)	13
1.12.2.1	Kompressionsleistung	13
1.12.2.2	Temperaturanstieg	13
1.12.3	Allgemeine Kontinuitätsgleichung	13
1.12.4	Volumetrische Wärmeausdehnung	13
1.12.5	Drosselung	14
1.12.5.1	Im laminaren Strömungsbereich	14
1.12.5.2	Im turbulenten Strömungsbereich	14
1.12.6	Pumpe / Motor	14
1.12.7	Kennlinien 4-Kanten Ventil	14
1.12.7.1	Drücke ohne Leckage	14
1.12.7.2	Durchfluss	14
1.12.7.3	Durchflusskennlinie	14
1.12.7.4	Druckkennlinie	15
1.12.7.5	Leckagekennlinie	15
1.12.7.6	Hydraulische Querschnitte berechnen	15

1 Strömungsmechanik

1.1 Linienkonzept

1.1.1 Steichlinie von A

sichtbare Linie

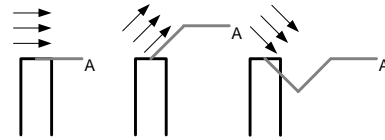


1.1.2 Pfadlinie von A

Weg des Teilchens



1.1.3 Stromlinien



1.2 Volumenstrom, Massenstrom

1.2.1 Volumenstrom

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \int d\dot{V} = \int_A w \cdot dA$$

1.2.1.1 Volumenstrom durch eine schräge Fläche

$$\dot{V} = w_n \cdot A = w_0 \cdot \sin \alpha \cdot A$$

1.2.2 Massenstrom

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \int d\dot{m} = \int_A \rho \cdot w_n \cdot dA$$

1.2.3 Kontinuitätsgleichung

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \text{const}$$

$$A_1 \cdot w_1 \cdot \rho_1 = A_2 \cdot w_2 \cdot \rho_2$$

1.2.3.1 inkompressible Strömung (konstanter Dichte)

$$\rho = \text{const}$$

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = \text{const}$$

$$A_1 \cdot w_1 = A_2 \cdot w_2$$

1.2.4 Machzahl

$$Ma = \frac{w}{w_{\text{Schall}}}$$

1.3 Strömungen

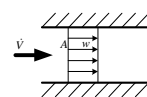
1.3.1 Ideales Fluid

$$w = \text{const}$$

$$\dot{V} = A \cdot w$$

1.3.1.1 Ideales Fluid Gas Bedingung

$$w \leq 0.2 \cdot w_{\text{Schall}}$$



1.3.2 Reales Fluid, laminare Strömung

w = parabelförmig

1.3.3 Reales Fluid, turbulente Strömung

w = "fast" idealer Verlauf

1.3.4 Reynoldszahl

1.3.4.1 Hydraulischer Durchmesser

$$d_{\text{Hydraulisch}} = \frac{4 \cdot A_{\text{Durchfluss}}}{U_{\text{benetzt}}}$$

1.3.4.2 Rohr

$$Re_{\text{Rohr}} = \frac{2 \cdot r \cdot \rho \cdot w}{\eta} = \frac{w \cdot d_{\text{Hydraulisch}}}{\nu}$$

Re < 2000 -> laminar

Re > 3000 -> turbulent

Re_{Kritisch scharfkantiger Einlauf} = 15

Re_{Kritisch Rohr} = 2320

1.3.4.3 Platte

$$Re_{\text{Platte}} = \frac{w_{\infty} \cdot x_{\text{Kritisch}}}{\nu}$$

$$Re_{\text{Kritisch Platte}} = 3.2 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$$

1.3.4.4 Zylinder

$$Re_{\text{Zylinder}} = \frac{w_{\infty} \cdot d}{\nu}$$

$$Re_{\text{Kritisch Zylinder}} = 3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$$

1.3.5 Ablösung

1.3.5.1 Laminar



1.3.5.2 Turbulent



1.4 Fluidstatik

1.4.1 Druck

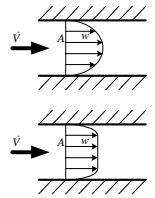
$$p = \frac{dF}{dA}$$

1.4.2 Hydrostatisches Gesetz

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h$$

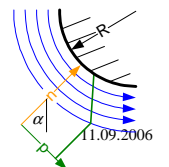
1.4.3 Krümmungsdrukformel (gilt nur bei Reibungsfreiheit)

$$\frac{dp}{dn} = -\rho \cdot \frac{w^2}{R}$$



$$[v] = \frac{m^2}{s}$$

$$v_{H_2O} = 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$



1.4.3.1 Krümmungsdruckformel mit Gewichtskraft

$$\frac{dp}{dn} = \rho \cdot g \cdot \cos(\alpha) - \rho \cdot \frac{w^2}{R}$$

1.5 Bernoulli

1.5.1 Bernoulligleichung

1.5.1.1 Bilanzierung

$$e_1 + Y = e_2 + e_v$$

1.5.1.2 Energiegleichung

$$\frac{w^2}{2} + gh + \frac{p}{\rho} = e_{ges} = const$$

$$[e] = \frac{m^2}{s^2}$$

1.5.1.3 Druckgleichung

$$\rho \frac{w^2}{2} + \rho gh + p = p_{Dynamisch} + \rho gh + p = const$$

$$[p] = Pa$$

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{Dynamisch}}{\rho}}$$

1.5.1.4 Höhengleichung

$$\frac{w^2}{2g} + h + \frac{p}{\rho g} = h_{ges} = const$$

$$[h] = m$$

1.5.2 Verluste

$$e_v = \zeta \cdot \frac{w^2}{2}$$

$$h_v = \zeta \cdot \frac{w^2}{2g}$$

$$\Delta p_v = \rho \cdot \zeta \cdot \frac{w^2}{2}$$

1.5.3 Spezifische Stutzenarbeit Y

$$e_a = Y$$

$$H_p = \frac{Y}{g}$$

$$p = Y \cdot \rho$$

1.5.3.1 Hydraulische Leistung

$$P_{hyd} = \dot{m} \cdot Y = \dot{V} \cdot \rho \cdot Y = \dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot h$$

1.6 Impulssatz und Drallsatz für stationäre Strömung

1.6.1 Energiestrom

$$\dot{E} = \frac{dE}{dt} = \int d\dot{E} = \int e \cdot d\dot{m} = \int_A e \cdot \rho \cdot w_n \cdot dA = \int_A \left(\frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} + g \cdot h \right) \cdot \rho \cdot w_n \cdot dA = \dot{W}_p + \dot{E}_{kin} + \dot{E}_{pot}$$

$$[\dot{E}] = \frac{Nm}{s} = W$$

$$w = \sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}$$

1.6.2 Impulssatz

$$\sum \vec{F} = \vec{J}_{aus} - \vec{J}_{ein}$$

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_p(\text{Druck}) + \vec{F}_\tau(\text{Reibung}) + \vec{F}_G(\text{Gewicht}) + \vec{F}_K(\text{Körper})$$

1.6.2.1 Impulsstrom

$$\vec{j} = \frac{d\vec{J}}{dt} = \frac{d(m \cdot \vec{w})}{dt} = \int \vec{w} \cdot d\dot{m} = \int_A \vec{w} \cdot \rho \cdot w_n \cdot dA$$

$$[j] = N$$

$$[w] = \frac{m}{s}$$

$$\begin{pmatrix} j_x \\ j_y \\ j_z \end{pmatrix} = \int_A \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{pmatrix} \cdot \rho \cdot w_n \cdot dA$$

1.6.3 Drallsatz

$$\sum \vec{M} = \vec{D}_{aus} - \vec{D}_{ein}$$

$$\sum \vec{M} = \vec{M}_p(\text{Druck}) + \vec{M}_\tau(\text{Reibung}) + \vec{M}_G(\text{Gewicht}) + \vec{M}_K(\text{Körper})$$

1.6.3.1 Drallstrom

$$\vec{D} = \frac{d\vec{D}}{dt} = \int (\vec{r} \times \vec{c}) \cdot c_n \cdot \rho \cdot dA$$

$$[D] = Nm$$

$$\begin{pmatrix} \dot{D}_x \\ \dot{D}_y \\ \dot{D}_z \end{pmatrix} = \int_A \begin{pmatrix} r_y \cdot c_z - r_z \cdot c_y \\ r_z \cdot c_x - r_x \cdot c_z \\ r_x \cdot c_y - r_y \cdot c_x \end{pmatrix} \cdot c_n \cdot \rho \cdot dA$$

$$[c] = \frac{m}{s}$$

1.6.4 Triebwerk

1.6.4.1 Schubkraft eines Triebwerks

$$F_{Sch} = \dot{m} \cdot (w_a - w_1)$$

1.6.4.2 Schubleistung eines Triebwerks

$$P_{Sch} = F_{Sch} \cdot w_1$$

1.6.5 Vereinfachte Propellertheorie

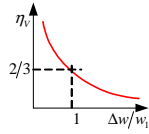
$$w_m = \frac{w_1 + w_2}{2}$$

$$F_{Schub} = \rho \frac{D_{Prop}^2 \cdot \pi}{4} \cdot w_m \cdot (w_2 - w_1) = \rho \frac{D_{Prop}^2 \cdot \pi}{8} (w_2^2 - w_1^2)$$

1.6.5.1 Vortriebswirkungsgrad

$$\eta_v = \frac{F_{Schub} \cdot w_1}{\dot{E}_{kin}} = \frac{F_{Schub} \cdot w_1}{\frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot (w_2^2 - w_1^2)} = \frac{2}{1 + \frac{w_2}{w_1}} = \frac{2}{2 + \frac{\Delta w}{w_1}}$$

$$P_{Mot} = \frac{F_{Schub} \cdot w_1}{\eta_v \cdot \eta_g}$$



1.7 Räumliche, reibungsfreie Strömungen

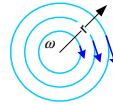
$\omega = konst$

1.7.1 Festkörperrotation (eigentlich keine Strömung)

$\omega = konst$

$$p(r) = p_{r=0} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 = p_{r=0} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\omega \cdot r)^2$$

$$w(r) = \omega \cdot r$$

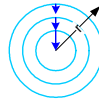


1.7.2 Quell- und Senkenströmungen

$\omega = 0$

$$p(r) = p_{r=0} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w(r_0)^2 \cdot \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right) = p_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w_0^2 \cdot \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right)$$

$$w_r(r) = \frac{E}{2\pi} \cdot \frac{1}{r}$$

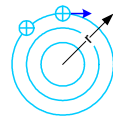


1.7.3 Potentialwirbel

$\omega = 0$

$$p(r) = p_0 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w_0^2 \cdot \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right)$$

$$w_t = \frac{C_1}{r}$$



1.7.4 Wirbelsenke (Abfluss, Potentialwirbel + Senke)

$$r = r_0 \cdot e^{\tan \alpha (\varphi - \varphi_0)}$$

$$p(r) = p_{r=0} + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w_0^2 \cdot \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right)$$

1.7.5 Rotation

$$\omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\vec{w} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_x \\ w_y \end{pmatrix}$$

1.7.5.1 3D-Rotation

$$\vec{\omega} = -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \end{pmatrix}$$

1.8 Reibungsgesetz

$$\tau \sim \Delta p$$

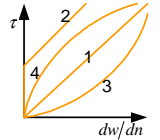
1.8.1 Dynamische Viskosität

$$\tau = \eta \cdot \frac{dw}{dn}$$

1.8.1.1 Fluidarten

- 1: Newton
- 2: Bingham
- 3: dilatant
- 4: pseudo plastisch

$$[\eta] = \frac{kg \cdot m}{s^2 \cdot m^2} \cdot s = \frac{kg}{m \cdot s} = Pa \cdot s$$



1.8.2 Kinematische Viskosität

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

$$[\nu] = \frac{m^2}{s}$$

1.8.3 Reibkraft

$$F = A \cdot \tau = \eta \cdot \frac{A \cdot w}{h}$$

1.8.4 Reibleistung

$$P = F \cdot w_0$$

1.8.5 Bewegungsgleichung

1.8.5.1 Reibungsfrei

$$\frac{\partial p}{\partial s} = -\rho \cdot w \cdot \frac{\partial w}{\partial s}$$

1.8.5.2 Reibungsbehaftet

$$\frac{\partial p}{\partial s} = -\rho \cdot w \cdot \frac{\partial w}{\partial s} + \eta \frac{\partial^2 w}{\partial n^2} + 2\eta \frac{\partial^2 w}{\partial s^2}$$

1.8.6 Strömungen in Lagern und Spalten

$$p' = \frac{dp(x)}{dx} = \eta \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2}$$

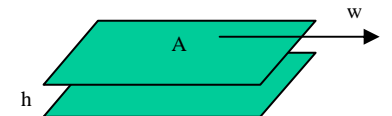
1.8.6.1 2x integriert

$$\frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2} = \frac{1}{\eta} p'$$

$$\int \Rightarrow \frac{\partial w(x, y)}{\partial y} = \frac{1}{\eta} p' y + c(x)$$

$$\int \Rightarrow w(x, y) = \frac{1}{2\eta} p' y^2 + c(x)y + d(x)$$

Coefficients of Viscosity for Various Fluids		
Fluid	t, °C	η, mPa·s
Water	0	1.8
	20	1.00
	60	0.65
Blood (whole)	37	4.0
Engine oil (SAE 10)	30	200
Glycerin	0	10,000
	20	1,410
	60	81
Air	20	0.018



1.9 Grenzschicht

$$Re_{\text{Platte}} = \frac{w_{\infty} \cdot x_{\text{Kritisch}}}{\nu}$$

$$Re_{\text{Kritisch Platte}} = 3.2 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$$

1.9.1 Verdrängungsdicke

$$\int_0^{\delta} (w_{\infty} - w(y)) dy = w_{\infty} \cdot \delta$$

$$\delta_s = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{w(y)}{w_{\infty}}\right) dy$$

1.9.2 Impulsmangeldichte

$$\int_A (\bar{w} \cdot \rho \cdot w_n) dA = \int_A (w_n^2 \cdot \rho) dA$$

1.10 Rohrströmung

1.10.1 Laminar

$$\Delta p \sim w$$

1.10.2 Turbulent

$$\Delta p \sim w^2$$

1.10.3 Colebrook

1.10.3.1 Laminar

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

1.10.3.2 Turbulent, rau

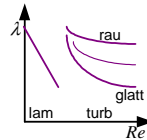
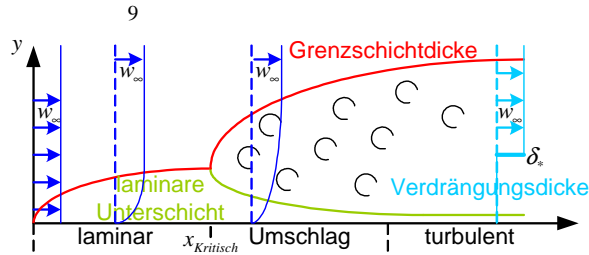
$$\lambda = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left(3.715 \cdot \frac{d}{k}\right)\right)^2}$$

1.10.3.3 Turbulent, Übergang

$$\lambda = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left(\frac{15}{Re} + \frac{k}{3.715 \cdot d}\right)\right)^2}$$

1.10.3.4 Turbulent, glatt

$$\lambda = \frac{0.309}{\log_{10} \left(\frac{Re}{7}\right)^2}$$



1.10.4 Rohrleitungsverluste

$$e_v = \lambda \cdot \frac{l}{d_h} \cdot \frac{w_m^2}{2}$$

$$\Delta p_v = \lambda \cdot \frac{l}{d_h} \cdot \rho \cdot \frac{w_m^2}{2}$$

$$h_v = \lambda \cdot \frac{l}{d_h} \cdot \frac{w_m^2}{2 \cdot g}$$

$$\zeta_{\lambda} = \lambda \cdot \frac{l}{d_h}$$

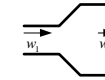
1.11 Rohrleitungseinbauten

1.11.1 Diffusor

$$e_v = \zeta_1 \cdot \frac{w_1^2}{2} = \zeta_2 \cdot \frac{w_2^2}{2}$$

$$\zeta_1 = \zeta_2 \cdot \frac{w_2^2}{w_1^2} = \frac{A_2^2}{A_1^2} = \frac{d_1^4}{d_2^4}$$

$$\zeta_2 = \zeta_1 \cdot \frac{w_1^2}{w_2^2} = \frac{A_1^2}{A_2^2} = \frac{d_2^4}{d_1^4}$$



1.11.1.1 Diffusorwirkungsgrad

$$\eta_D = \frac{\Delta p_{\text{Real}}}{\Delta p_{\text{Ideal}}} = 1 - \frac{\zeta_1}{1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}}$$

$$\zeta_1 = (1 - \eta_D) \cdot \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right)$$

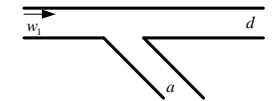
1.11.1.1.1 Unterer Diffusorwirkungsgrad

$$\eta_v = \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right) - \zeta_1 = \eta_D \cdot \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right)$$

$$\eta_D = \frac{\eta_v}{1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}}$$

1.11.2 Trennung (Leistungsbilanz mit Bernoulli)

$$\dot{m} \cdot \left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{w_1^2}{2}\right) = \dot{m}_d \cdot \left(\frac{p_d}{\rho} + \frac{w_d^2}{2}\right) + \dot{m}_a \cdot \left(\frac{p_a}{\rho} + \frac{w_a^2}{2}\right) + \dot{m}_d \cdot \zeta_d \cdot \frac{w_1^2}{2} + \dot{m}_a \cdot \zeta_a \cdot \frac{w_1^2}{2}$$



1.11.3 Rohrleitungselementverluste

$$e_v = \zeta \cdot \frac{w^2}{2}$$

$$\Delta p_v = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2}$$

$$h_v = \zeta \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}$$

1.11.3.1 Verlustleistung

$$\dot{E}_v = \rho \cdot \dot{V} \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w_m^2}{2} = \rho \cdot \dot{V}^3 \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d^5} \cdot \frac{8}{\pi^2}$$

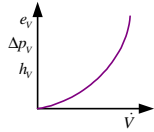
1.11.4 Verlustkurven

$$e_v = c_e \cdot \dot{V}^2$$

$$\Delta p_v = c_p \cdot \dot{V}^2$$

$$h_v = c_h \cdot \dot{V}^2$$

$$c_e = \frac{c_p}{\rho} = g \cdot c_h$$



$$[c_e] = \frac{1}{m^4}$$

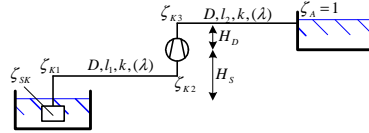
$$[c_p] = \frac{s^2 \cdot Pa}{m^6} = \frac{kg}{m^7}$$

$$[c_h] = \frac{s^2}{m^5}$$

1.11.5 Verluste

$$e_{V,links} = \frac{w^2}{2} \cdot \left(\zeta_{SK} + \zeta_{K1} + \zeta_{K2} + \lambda \cdot \frac{l_1}{D} \right) = \frac{w^2}{2} \cdot \zeta_{links}$$

$$e_{V,rechts} = \frac{w^2}{2} \cdot \left(\zeta_{K3} + \zeta_A + \lambda \cdot \frac{l_2}{D} \right) = \frac{w^2}{2} \cdot \zeta_{rechts}$$

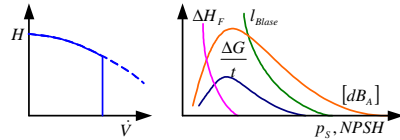
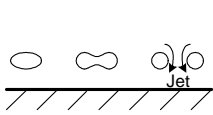


1.11.5.1 Kavitation, NPSH

$$p_s = p_0 - \left(\rho \cdot \left(\frac{w^2}{2} + e_s \right) + \rho \cdot g \cdot H_s \right)$$

$$NPSH = \frac{p_s - p_v}{\rho \cdot g} + \frac{w^2}{2 \cdot g}$$

$$p_{v,H20} =$$



1.11.6 Pumpen

1.11.6.1 Parallelschaltung

$$H = H_1 = H_2$$

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2$$

1.11.6.2 Serieschaltung

$$H = H_1 + H_2$$

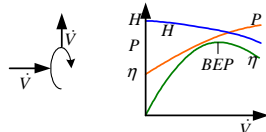
$$\dot{V} = \dot{V}_1 = \dot{V}_2$$

1.11.6.3 Pumpenleistung

$$P_{hyd} = \rho \cdot \dot{V} \cdot g \cdot H = \dot{m} \cdot Y$$

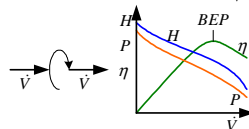
1.11.6.4 Radialpumpen

Anfahren an geschlossenen Schieber



1.11.6.5 Axialpumpen

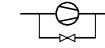
Anfahren an geöffneten Schieber



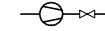
1.11.6.6 Spezifische Drehzahl

$$n_q = n_{[min^{-1}]} \cdot \sqrt{\frac{\dot{V}_{[m^3/s]}}{H_{[m]}^{3/4}}}$$

1.11.6.7 Bypassregelung



1.11.6.8 Drosselung



1.11.6.9 Drehzahlregelung

$$\dot{V} \sim n$$

$$H \sim n^2$$

$$P \sim n^3$$

1.11.6.10 Anpassung der Kennlinien an Betriebsdaten durch Abdrehen oder Zuspitzen

$$\dot{V}_{neu} = \dot{V} \cdot \left(\frac{D_{neu}}{D} \right)^{2.3}$$

$$H_{neu} = H \cdot \left(\frac{D_{neu}}{D} \right)^{2.3}$$

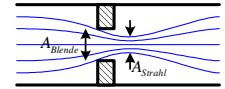
$$H \sim n^2$$

$$P \sim n^3$$

1.11.7 Blende

$$\alpha = \frac{A_{Strahl}}{A_{Blende}}$$

$$m = \frac{A_{Blende}}{A_{Rotor}}$$



1.12 Ölhydraulik

1.12.1 Hydraulik

1.12.1.1 Hydraulische Kraftübertragung (1 Flüssigkeitsraum)

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

1.12.1.2 Hydraulische Druckübersetzung (2 Flüssigkeitsräume)

$$F = p_1 \cdot A_1 = p_2 \cdot A_2$$

1.12.2 Kompressibilität (Bulk-Modul)

$$B = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V}$$

$$\Delta V = -\frac{1}{B} \cdot V \cdot \Delta P$$

$$|\Delta P| = \frac{\Delta V \cdot B}{V}$$

1.12.2.1 Kompressionsleistung

$$P = p \cdot \dot{V}$$

1.12.2.2 Temperaturanstieg

$$\Delta \vartheta = \frac{W_{Kompr}}{\rho \cdot V \cdot c}$$

$$c_{oi} = 2100 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$$

$$\rho_{oi} = 870 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

1.12.3 Allgemeine Kontinuitätsgleichung

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_2 = \frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho \cdot V)}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{dV}{dt}$$

$$\dot{\rho} = \frac{B}{V} [\dot{V}_1 - \dot{V}_2 - A \cdot \dot{y}]$$

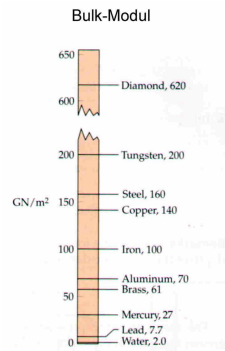
1.12.4 Volumetrische Wärmeausdehnung

$$\Delta V = V \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta$$

$$B = \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$1 \left[\frac{GN}{m^2} \right] = 10^9 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$B_{Mineralöle} = 1,5 - 1,7 \cdot 10^9 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$



$$\dot{V} = \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$A = \left[m^2 \right]$$

$$v = \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\alpha = \left[\frac{1}{K} \right]$$

$$\alpha_{Mineralöle} = 0.0007 \left[\frac{1}{K} \right]$$

1.12.5 Drosselung

1.12.5.1 Im laminaren Strömungsbereich

$$\dot{V} = K \cdot A_0 \cdot (p_1 - p_2)$$

$$\dot{V} = \frac{d^2}{32 \cdot \eta \cdot l} \cdot A_0 \cdot (p_1 - p_2)$$

$$\eta = [Pa \cdot s]$$

1.12.5.2 Im turbulenten Strömungsbereich

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

$$\dot{V} = \frac{c_0 \cdot c_V \cdot A_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{c_0 \cdot A_0}{A_1} \right)^2}} \cdot (p_1 - p_2)$$

$$c_V = 0.95$$

$$K_V \text{ Drossel} = 0.6$$

1.12.6 Pumpe / Motor

$$\dot{V} = V_M \cdot n$$

$$P_{Mot} = M_{Mot} \cdot \dot{\phi}_{Rot}$$

$$V_M = \left[\frac{m^3}{(\text{Umdrehung})} \right]$$

$$n = \left[\frac{(\text{Umdrehung})}{s} \right]$$

1.12.7 Kennlinien 4-Kanten Ventil

$$\dot{V}_1 = K_V \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} [A_1(x) \sqrt{p_s - p_1} - A_2(x) \sqrt{p_1}]$$

$$\dot{V}_2 = K_V \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} [A_1(x) \sqrt{p_2} - A_2(x) \sqrt{p_s - p_2}]$$

1.12.7.1 Drücke ohne Leckage

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = \dot{V}_L$$

$$p_1 = \frac{p_s + p_L}{2}$$

$$p_2 = \frac{p_s - p_L}{2}$$

1.12.7.2 Durchfluss

$$\dot{V}_L(x, p_L) = K_V \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} [A_1(x) \sqrt{\frac{p_s - p_L}{2}} - A_2(x) \sqrt{\frac{p_s + p_L}{2}}]$$

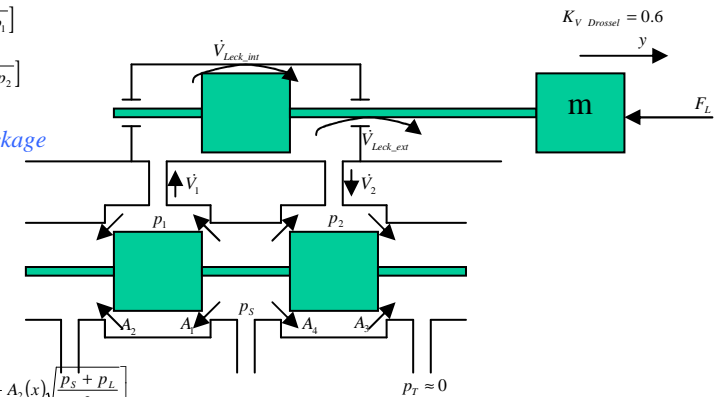
$$\frac{\dot{V}_L(x, p_L)}{\dot{V}_L(x_{max}, p_L = 0)}$$

1.12.7.2.1 Idealer Nullschnitt

$$\dot{V}_L(x = x_{max}, p_L = 0) = K_V \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} [\pi \cdot D \cdot x_{max} \sqrt{\frac{p_s}{2}}]$$

1.12.7.3 Durchflusskennlinie

$$\dot{V}_L(x, p_L = 0) = K_V \cdot \sqrt{\frac{p_s}{\rho}} [A_1(x) - A_2(x)]$$



1.12.7.3.1 Durchflussverstärkung

$$K_G = \frac{\partial \dot{V}_L}{\partial x} \Big|_{p_1=p_2=0, x=0}$$

1.12.7.4 Druckkennlinie

$$p_L = p_S \cdot \frac{A_1^2(x) - A_2^2(x)}{A_1^2(x) + A_2^2(x)}$$

$$\frac{p_L}{p_S} = \text{Normiert}$$

1.12.7.4.1 „Druckverstärkung“

$$K_p = \frac{\partial p_L}{\partial x} \Big|_{v_1=v_2=0, x=0}$$

1.12.7.5 Leckagekennlinie

$$\dot{V}_{Leck}(x) = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot K_V \cdot \sqrt{\frac{p_S}{\rho}} \cdot \frac{A_1(x) \cdot A_2(x)}{\sqrt{A_1^2(x) + A_2^2(x)}}$$

$$\frac{\dot{V}_{Leck}(x)}{\dot{V}_{Leck}(x=0)} = \text{Normiert}$$

1.12.7.6 Hydraulische Querschnitte berechnen

$$A_1(x) = \frac{\dot{V}_{Leck}(x)}{2 \cdot K_V \cdot \sqrt{\frac{p_S}{\rho}} \cdot \sqrt{1 - \frac{p_L}{p_S}}(x)}$$

$$A_1(x) = \frac{\dot{V}_{Leck}(x)}{2 \cdot K_V \cdot \sqrt{\frac{p_S}{\rho}} \cdot \sqrt{1 + \frac{p_L}{p_S}}(x)}$$