

Formelsammlung Strömungsmechanik
Bergische Universität Wuppertal
Version 1.16 - 15.07.2024

Grundlagen

Dimensionslose Kennzahlen

Buckingham'sches Π -Theorem	n physik. Parameter $f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) = 0$ i Grunddimensionen $F(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-i})$ $(n - i)$ dimensionslose Kennzahlen Π
Dimensionslose Kennzahlen	Kapillar-Zahl $Ca = \frac{v \rho c}{\sigma}$ Euler-Zahl $Eu = \frac{p}{\rho c^2}$ Froude-Zahl $Fr = \frac{c}{\sqrt{gD}}$ Mach-Zahl $Ma = \frac{c}{a}$ Reynolds-Zahl $Re = \frac{cD}{\nu}$ Strouhal-Zahl $St = \frac{D}{ct}$ Weber-Zahl $We = \frac{\rho c^2 L}{\sigma}$ Widerstandsbeiwert $c_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho c^2 A}$
Scherspannung für Schichtströmungen (kartesisch, Zylinder)	$\tau = \eta \frac{du}{dy}, \quad \tau = \eta \frac{dw}{dr}$

Hydrostatik

Oberflächenspannung

Definition Oberflächenspannung	$\sigma = \frac{F}{l}$
Young-Laplace-Gleichung für beliebig gekrümmte Flächen	$p_a - p_i = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (r > 0 \text{ konkav})$

Kräfte auf Bauteile

Hydrostatisches Grundgesetz (Orientierung g und z beachten!)	$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$ $p = -\rho g z + C$
Auftriebskraft	$F_A = \rho g V_{\text{verdrängt}}$
Druckkraft auf beliebig gekrümmte Fläche	$F = \int_x \int_y p(x, y) dx dy$
Horizontalkraft (S Schwerpunkt, A_y projizierte Fläche)	$F_y = \rho g t_s \cdot A_y$
Kraftangriffspunkt (D Druckpunkt)	$e_y = t_{D,y} - t_{S,y} = \frac{I_{S,y}}{t_{S,y} \cdot A_y}$
Vertikalkraft	$F_t = \rho g V$

Hydrostatische Gleichung

Isotherme Schichtung (für $\Delta z \leq 400 \text{ m}$)	$p = p_0 e^{-\left(\frac{\rho_0 g}{p_0}\right)z}$
Isentrope Schichtung	$p = p_0 \left(1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{\rho_0 g}{p_0} z\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$

Fluiddynamik

Fluidkinematik

Mittlere Strömungsgeschwindigkeit	$\bar{c} = \frac{1}{A} \int_A c dA$
Geschwindigkeit eines Fluidteilchens entlang eines Stromfadens	$c = \frac{ds}{dt} = e \frac{ds}{dt}$
Stationäre Strömungsgeschwindigkeit	$c = \frac{ds}{dt} = \dot{s} = f(s)$
Instationäre Strömungsgeschwindigkeit	$c = \frac{ds}{dt} = \dot{s} = f(s, t)$
Beschleunigung	$a = \frac{dc}{dt} = \dot{c} = \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial c}{\partial s} \frac{ds}{dt} = \frac{\partial c}{\partial t} + c \frac{\partial c}{\partial s}$
Tangentialgeschwindigkeit	$c_T = \frac{d\phi}{dt} r = \omega r$
Kontinuitätsgleichung	$\dot{m} = \rho A c = \text{konstant}$ $\dot{V} = A c = \text{konstant} \quad (\text{nur inkompressibel})$

Umströmung von Körpern

Widerstandskraft	$F_W = \frac{1}{2} c_W A \rho c_\infty^2$
Auftriebskraft	$F_A = \frac{1}{2} c_A A \rho c_\infty^2$
Gleitzahl	$\epsilon = \frac{c_W}{c_A}$

Kugelumströmung

Reynoldszahl einer umströmten Kugel	$Re_d = \frac{c d_{\text{Kugel}}}{\nu}$
-------------------------------------	---

Laminare Grenzschicht

Näherungslösung nach Stokes $Re_d < 1$	$c_W = \frac{24}{Re_d}$
Näherungslösung nach Kaskas $1 < Re_d < 10^3$	$c_W = \frac{24}{Re_d} + \frac{4}{\sqrt{Re_d}} + 0,4$
$10^3 < Re_d < 10^5$	c_W nahezu konstant auf 0,5

Umschlag von einer laminaren in eine turbulente Grenzschicht ($= Re_{krit}$)

Sehr turbulente Anströmung	$Re_{krit} = Re_d = 1,7 \cdot 10^5$
Sehr laminare Anströmung	$Re_{krit} = Re_d = 4 \cdot 10^5$

Definition der kritischen Reynolds-Zahl bei einer Kugelströmung

Umschlagpunkt	$Re_{krit} = Re_d(c_W = 0,3)$
---------------	-------------------------------

Fluidkinetik

Eindimensionale Energiegleichung

Energiegleichung, inkompressibel entlang eines Stromfadens	$\rho g z_1 + p_1 + \rho \frac{c_1^2}{2} = \rho g z_2 + p_2 + \rho \frac{c_2^2}{2}$
Energiegleichung, inkompressibel im rotierenden System (w Relativgeschwindigkeit, u Umfangsgeschwindigkeit)	$\rho g z_1 + p_1 + \rho \frac{w_1^2}{2} - \rho \frac{u_1^2}{2} = \rho g z_2 + p_2 + \rho \frac{w_2^2}{2} - \rho \frac{u_2^2}{2}$
Energiegleichung mit Berücksichtigung innerer Energie u	$\rho g z_1 + p_1 + \rho \frac{c_1^2}{2} + \rho u_1 = \rho g z_2 + p_2 + \rho \frac{c_2^2}{2} + \rho u_2$
Erweiterte Energiegleichung, inkompressibel	$\rho g z_1 + p_1 + \rho \frac{c_1^2}{2} = \rho g z_2 + p_2 + \rho \frac{c_2^2}{2} + \rho Y_{V,12}$
Instationäre Energiegleichung, inkompressibel	$\rho g z_1 + p_1 + \rho \frac{c_1^2}{2} = \rho g z_2 + p_2 + \rho \frac{c_2^2}{2} + \rho Y_{V,12} + \rho \int_1^2 \frac{\partial c}{\partial t} ds$
Druckbegriffe	$p = \text{Statischer Druck}$ $\rho \frac{c^2}{2} = \text{Dynamischer Druck}$ $\rho g h = \text{Hydrostatischer Druck}$ $p_{ges} = p + \rho \frac{c^2}{2} = \text{Gesamtdruck}$

Rohrströmungen

Rohr-Reynoldszahl	$Re = \frac{\rho \cdot D_h \cdot \bar{c}}{\eta}$
Hydraulischer Durchmesser	$D_h = 4 \frac{A}{U}$
Geschwindigkeitsprofil nach Nikuradse	$c(r) = \left(1 - \frac{r}{R}\right)^n c_{max}$ $\bar{c} = K c_{max} \text{ mit } K = \frac{2}{(n+1)(n+2)}$

n und K für bestimmte Re -Zahlen

Re	$4 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^6$
n	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{6.6}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{8.8}$
K	0.791	0.807	0.817	0.850

Verlustenergie Rohr	$Y_V = \lambda \frac{L}{D} \frac{\bar{c}^2}{2}$	
Laminares Gebiet	$\lambda = f(Re) = \frac{64}{Re}$	$Re < Re_{kr} = 2320$
Turbulentes Gebiet und glattes Verhalten $Re > Re_{kr} = 2320$ und $k_s \approx 0$	<p>Näherung nach Blasius $\lambda = \frac{0.316}{\sqrt[4]{Re}}$</p> <p>Näherung nach Nikuradse $\lambda = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}$</p> <p>Näherung nach Prandtl $\lambda \approx \frac{0.309}{\left(\log_{10}(Re - 0.845)\right)^2}$</p>	<p>$Re_{kr} \leq Re \leq 10^5$</p> <p>$10^5 \leq Re \leq 10^8$</p> <p>$Re \geq Re_{kr}$</p>
Übergangsgebiet zwischen glattem und rauem Verhalten	<p>Interpolationsformel nach Colebrook</p> $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} + 0.27 \frac{k_s}{D} \right)$	$Re > Re_{kr} = 2320$
Turbulentes Gebiet und rauhes Verhalten	<p>Näherung nach Kármán-Nikuradse</p> $\lambda = \frac{1}{\left(2 \log_{10} \left(\frac{D}{k_s} \right) + 1.14\right)^2}$	$Re > Re_{kr} = 2320$

Rohreinbauten

Allgemeiner Druckverlust / Verlustenergie	$\Delta p_V = \xi \frac{\rho}{2} c^2 \quad \text{bzw.} \quad Y_V = \xi \frac{1}{2} c^2$
Rohrauslaufwiderstand	$\xi = \left(\frac{D_h}{D_{Str}} \right)^2 - 1$
Borda- / Carnot-Stoß	$\xi = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2$
Diffusorwiderstand ($8^\circ - 10^\circ$)	$\xi \approx n \left[\left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 - 1 \right]$ mit Anpassungsfaktor $n = 0,15 - 0,22$
Verlustleistung	$P_V = Y_V \dot{m}$
Pumpleistung	$P_P = \Delta p_P \dot{V}$
Volumetrischer Wirkungsgrad	$\eta = \frac{\dot{V}_{\text{effektiv}}}{\dot{V}_{\text{theoretisch}}}$
Effektive Leistung Pumpe/Turbine	$P_{P, \text{effektiv}} = \frac{P_P}{\eta_P} \quad P_{T, \text{effektiv}} = P_T \eta_T$
Spezifische Rotationsenergie	$e = \frac{1}{2} r^2 \omega^2 \quad \text{mit } v = r \omega$

Impuls

Impulssatz	$\sum \vec{F} - \sum \frac{d\vec{I}}{dt} = 0$
Impulsstrom (stationär)	$\dot{I} = \dot{m} \vec{c} = \rho \dot{V} \vec{c} = \rho A c \vec{c}$
Impulsstrom (instationär)	$\dot{I} = m \frac{d\vec{c}}{dt} + \dot{m} \vec{c}$
Durckkraft	$\vec{F}_n = p \vec{A}$
Gravitationskraft	$\vec{F}_G = m \vec{g} = \rho V \vec{g}$

Navier-Stokes-Gleichungen, kartesische Koordinaten

Massenerhaltung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = 0$$

Energiegleichung

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]$$

Impulsbilanz x-Richtung

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x$$

Impulsbilanz y-Richtung

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y$$

Impulsbilanz z-Richtung

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z$$

Navier-Stokes-Gleichungen, Zylinderkoordinaten

Massenerhaltung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho v) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w) = 0$$

Energiegleichung

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + 2\mu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial \theta} + u \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \left[\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right) \right)^2 \right]$$

Impulsbilanz r-Richtung

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + \rho g_r$$

Impulsbilanz θ -Richtung

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{uv}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + \rho g_\theta$$

Impulsbilanz z-Richtung

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + \rho g_z$$

Potentialströmung

Kontinuitätsbedingung	$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$
Wirbelfreiheit	$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0$
Vortizität	$\omega = \nabla \times u = 2\Omega$
Stromfunktion	$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$
Potentialfunktion	$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad v = \frac{\partial \Phi}{\partial y}$
Zirkulation	$\Gamma = \int_A \omega \cdot dA = \int_A (\nabla \times u) \cdot dA = \oint_C u \cdot dx$

Elementare Potentialfunktionen

Allgemeiner Ansatz	$f(z) = \Phi + i\Psi$
Koordinate z	$z = x + iy = r \cdot e^{i\varphi} = r(\cos \varphi + i \sin \varphi)$
Ableitung	$f'(z) = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + i \frac{\partial \Psi}{\partial x} = u - iv$
Ebene Translationsströmung	$f(z) = a \cdot z \quad a = a_1 + ia_2$ $f(z) = \underbrace{(a_1x + a_2y)}_{\varphi} + i \underbrace{(a_1y - a_2x)}_{\psi}$
Ebene Staupunktströmung	$f(z) = \frac{a}{2} \cdot z^2 \quad a \in \mathbb{R}$ $f(z) = \underbrace{\frac{a}{2}(x^2 - y^2)}_{\varphi} + i \underbrace{axy}_{\psi}$
Quelle / Senke	$f(z) = \frac{Q}{2\pi} (\ln r + i\varphi) \quad Q > 0 : \text{Quelle}$
Potentialwirbel	$f(z) = \frac{-\Gamma}{2\pi} (i \ln r - \varphi) \quad \Gamma > 0 \text{ entgegen Uhrzeiger}$

Strömungen mit Dichteänderung

Schallgeschwindigkeit (Laplace)	$a = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}}$
Schallgeschwindigkeit (isentrop)	$a_s = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\kappa p v} = \sqrt{\kappa R_s T}$
Eindimensionale Energiegleichung	$gz_1 + \frac{c_1^2}{2} + h_1 = gz_2 + \frac{c_2^2}{2} + h_2$
Eindimensionale Energiegleichung für Rohrströmung mit konst. Durchmesser	$pdp + \frac{p_1}{T_1} \frac{c_1^2}{v_1} T \frac{dc}{c} + \frac{c_1^2 p_1}{2v_1 T_1 D} T \lambda dx = 0$
Druckverlust für Rohrströmung mit konst. Durchmesser (polytrop, adiabath)	$\Delta p = \rho_1 \lambda_1 \frac{L}{D} \frac{c_1^2}{2} \frac{\bar{T}}{T_1}$
Druckverlust für Rohrströmung mit konst. Durchmesser (isotherm)	$\Delta p = \rho_1 \lambda_1 \frac{L}{D} \frac{c_1^2}{2}$
Mittlere Temperatur	$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2}$
Polytropenbeziehung	$pv^n = \text{const}$
Isentropenbeziehung	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}, \quad \frac{p_1}{\rho_1^\kappa} = \frac{p_2}{\rho_2^\kappa}$
Ideales Gasgesetz	$pV = mR_s T = nRT$

Düsenströmungen - Indizes 1 und 2 je nach Aufgabe wählen mit $p_1 > p_2$!

Kritisches Druckverhältnis	$P_{krit} = \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$
Kritisches Druckverhältnis	$\frac{p_2}{p_1} < P_{krit} \text{ (überkritisches Ausströmen)}$ $\frac{p_2}{p_1} > P_{krit} \text{ (unterkritisches Ausströmen)}$
Isentrope Ausströmgeschwindigkeit	$c_{2,s} = \sqrt{c_1^2 + 2 \frac{\kappa}{\kappa-1} R_s T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}$
Isentrope Ausströmgeschwindigkeit für kleine c_1	$c_{2,s} = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}$
Geschwindigkeits Zahl φ	$c_2 = \varphi c_{2,s}$ <p>Bei Düsen $\varphi \approx 0,9 \dots 0,99$ (Richtwert)</p>
Theoretisch ausfließender Massenstrom	$\dot{m}_{th} = A_2 \sqrt{2 p_1 \rho_1} \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}$ $\dot{m}_{th} = A_2 \psi_{A,2} \sqrt{2 p_1 \rho_1}$
Ausflußfunktion aus Düse	$\psi_{A,2} = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right)}$
Wärmekapazität	c_p = spez. Wärmekapazität bei konst. Druck c_v = spez. Wärmekapazität bei konst. Volumen $c_p = c_v + R_s \quad c_p = \frac{\kappa \cdot R_s}{\kappa-1} \quad c_v = \frac{R_s}{\kappa-1}$
Enthalpie und Leistung	<p>Verlustleistung: $P = \dot{m}_{max} \cdot \Delta h_s$</p> <p>spezifische Enthalpie: $\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1)$</p> $\Delta h_s = c_p \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$

Fluid	κ	P_{krit}	$\psi_{a,krit}$
Einatomige Gase	1,67	0,487	0,514
Zweiatomige Gase	1,40	0,528	0,484
Mehratomige Gase	1,33	0,540	0,476
(Wasser-)Heißdampf	1,30	0,546	0,472
(Wasser-)Sattdampf	1,135	0,577	0,449

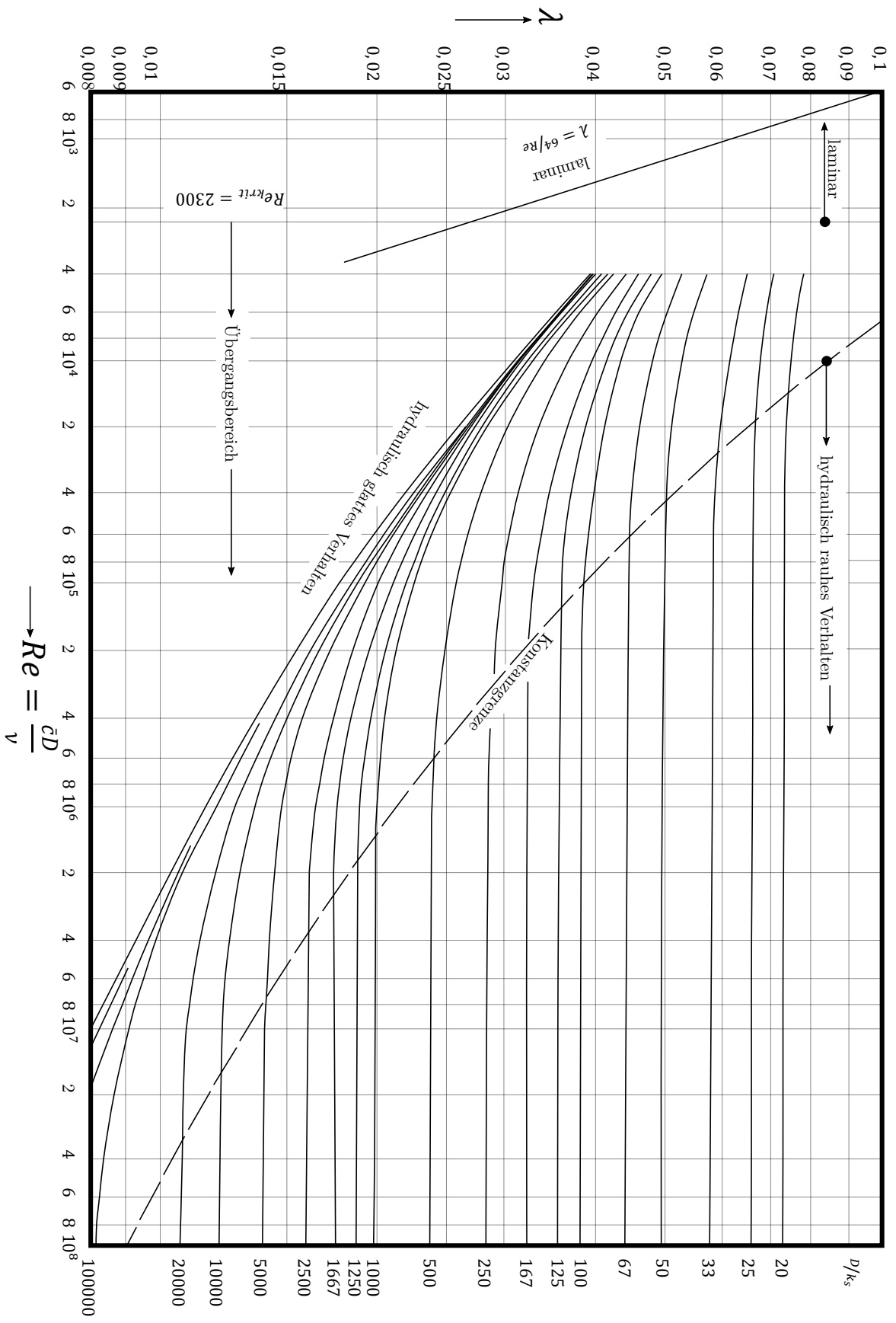
Symbol	Physikalische Größe	Einheit
a	Beschleunigung	$1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
A	Fläche, Querschnitt	1 m^2
c	Geschwindigkeit	$1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
c_a	Ausströmgeschwindigkeit	
c_s	Schallgeschwindigkeit	
c_p	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$1 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{kg K}} = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{K s}^2}$
D	Rohrdurchmesser	$1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$
D_h	Hydraulischer Durchmesser	
E	Energie	$1 \text{ J} = 1 \text{ W s} = 1 \text{ N m} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$
F	Kraft	$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}$
I	Impuls	$1 \text{ N s} = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}}$
I	Flächenmoment 2. Ord.	m^4
k_s	Äquivalente Sandrauigkeit	1 mm
L	Rohrlänge	$1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$
M	Moment	1 N m
\dot{m}	Massenstrom	$1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$
n	Drehzahl	$1 \frac{1}{\text{min}}$
n	Stoffmenge	1 mol
p	Druck	$1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 0.01 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2} = 0.0001 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ $1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ $1 \text{ bar} = 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$
p_a	Umgebungsdruck	
p_i	Innendruck	
p	Überdruck	
P	Leistung	$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^3}$
r_1, r_2	Hauptkrümmungsradien	$1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$
R	Rohrradius	$1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$

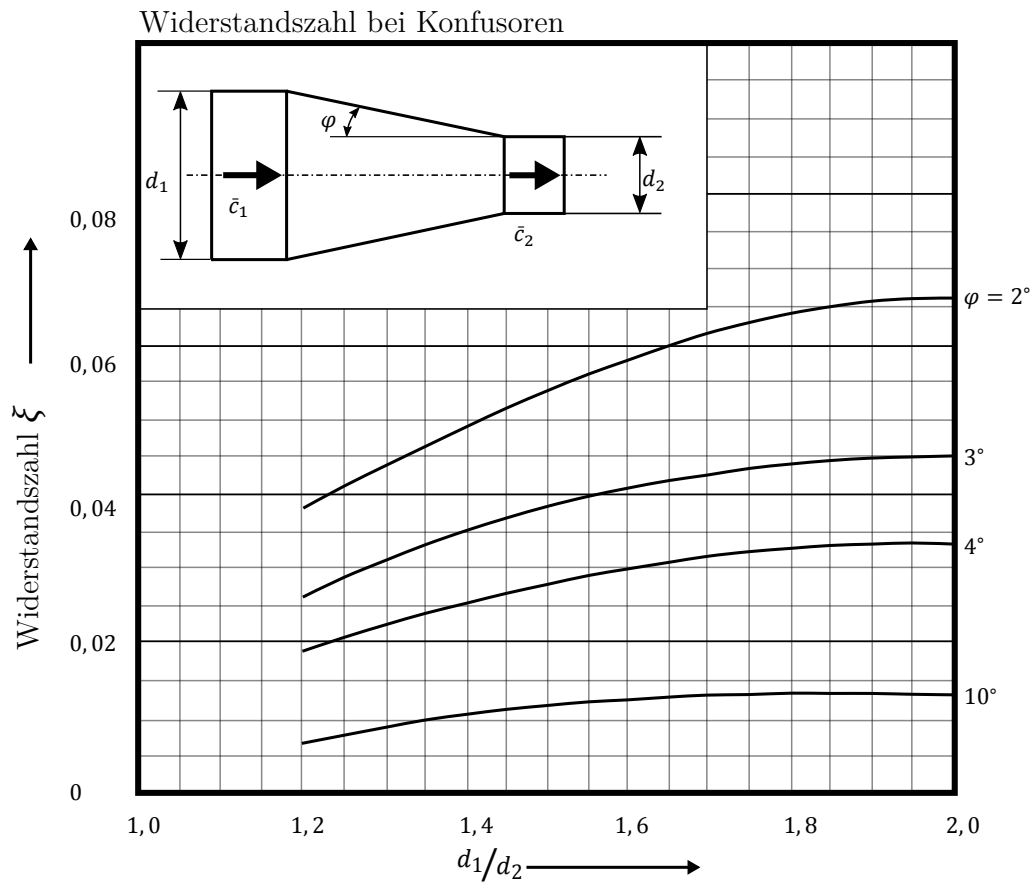
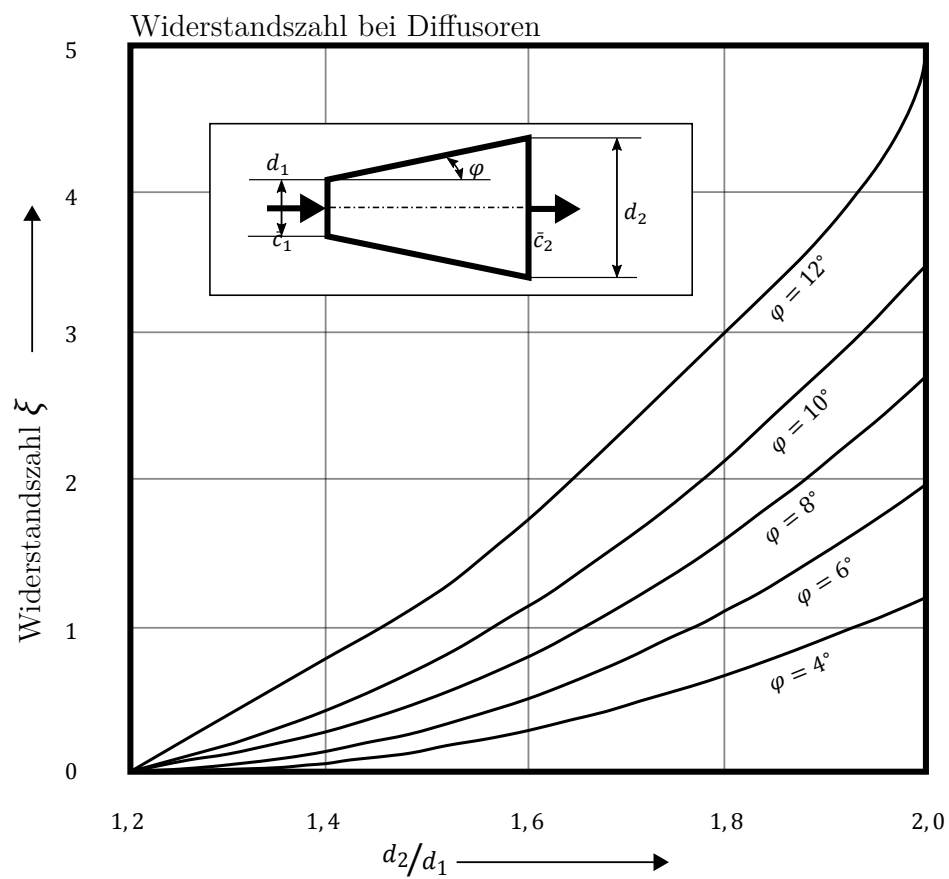
R	universale Gaskonstante	$8,314463 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$
R_s	spezifische Gaskonstante	$1 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{kg K}} = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{K s}^2}$
s	spezifische Entropie	$1 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{kg K}} = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{K s}^2}$
t	Zeit	$1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$
t	Tiefe	1 m
T	Temperatur	1 Kelvin
T_a	Außentemperatur	
T_i	Innentemperatur	
u	Spezifische Innere Energie	$1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \frac{\text{Ws}}{\text{kg}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{kg}} = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$
U	Umfang	$1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$
v	spezifisches Volumen	$1 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 10^3 \frac{\text{dm}^3}{\text{kg}} = 10^6 \frac{\text{cm}^3}{\text{kg}} = 10^9 \frac{\text{mm}^3}{\text{kg}}$
\dot{V}	Volumenstrom	$1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 10^3 \frac{\text{dm}^3}{\text{s}} = 10^6 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = 10^9 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}$
W	Arbeit	$1 \text{ J} = 1 \text{ W s} = 1 \text{ N m} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$
Y_V	Verlustenergie	$1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 1 \frac{\text{Ws}}{\text{kg}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{kg}} = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$
z	Höhe über Nullniveau	$1 \text{ m} = 1000 \text{ mm}$
η, μ	Dynamische Viskosität ($\rho \nu$)	$1 \text{ Pa s} = 1 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m s}}$
ν	Kinematische Viskosität ($\frac{\eta}{\rho}$)	$1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
ρ	Dichte	$1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
σ	Oberflächenspannung	$1 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$

Dimensionslose Größen

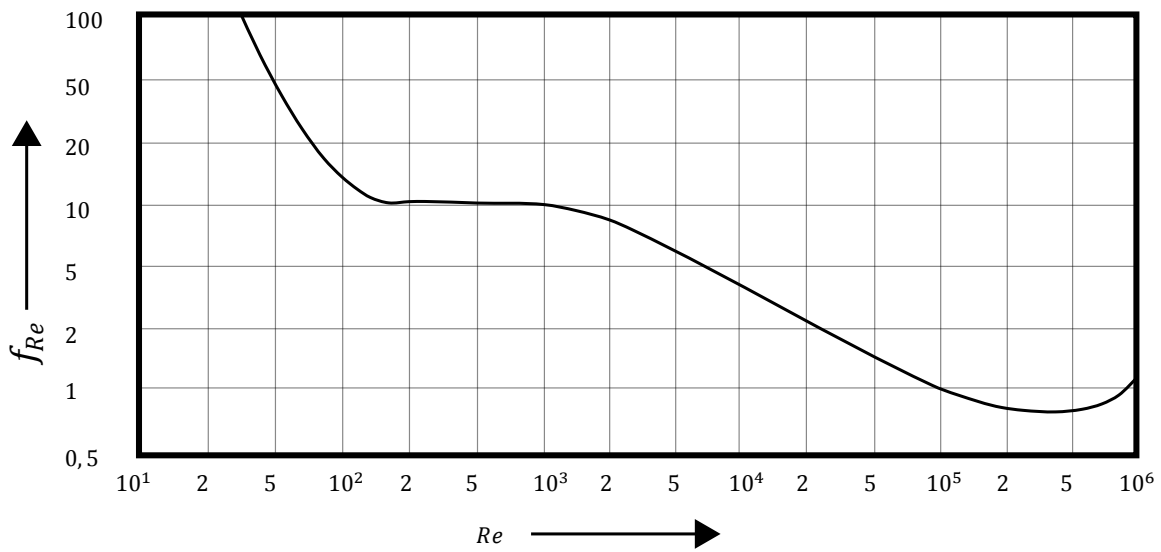
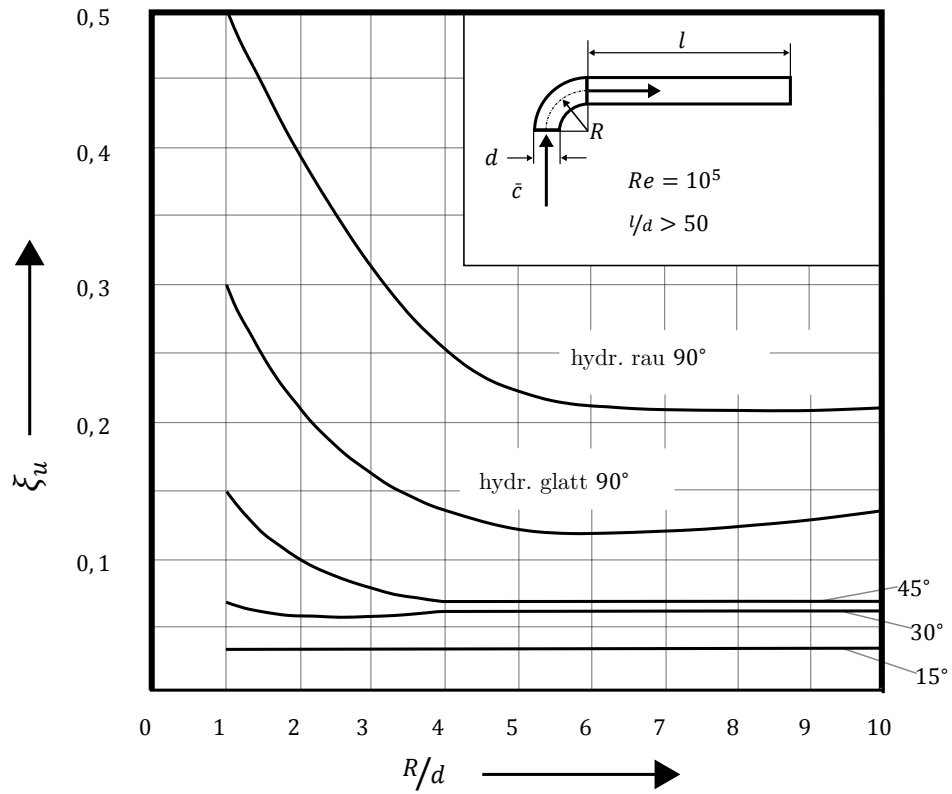
Reynoldszahl Re	Mach-Zahl Ma
Euler-Zahl Eu	Froude-Zahl Fr
Rohrreibungszahl λ	Widerstandszahl ξ
Wirkungsgrad η	Isentropenexponent $\kappa = 1,4$ (Luft)
Widerstandsbeiwert c_W	Auftriebsbeiwert c_A

Moody-Diagramm



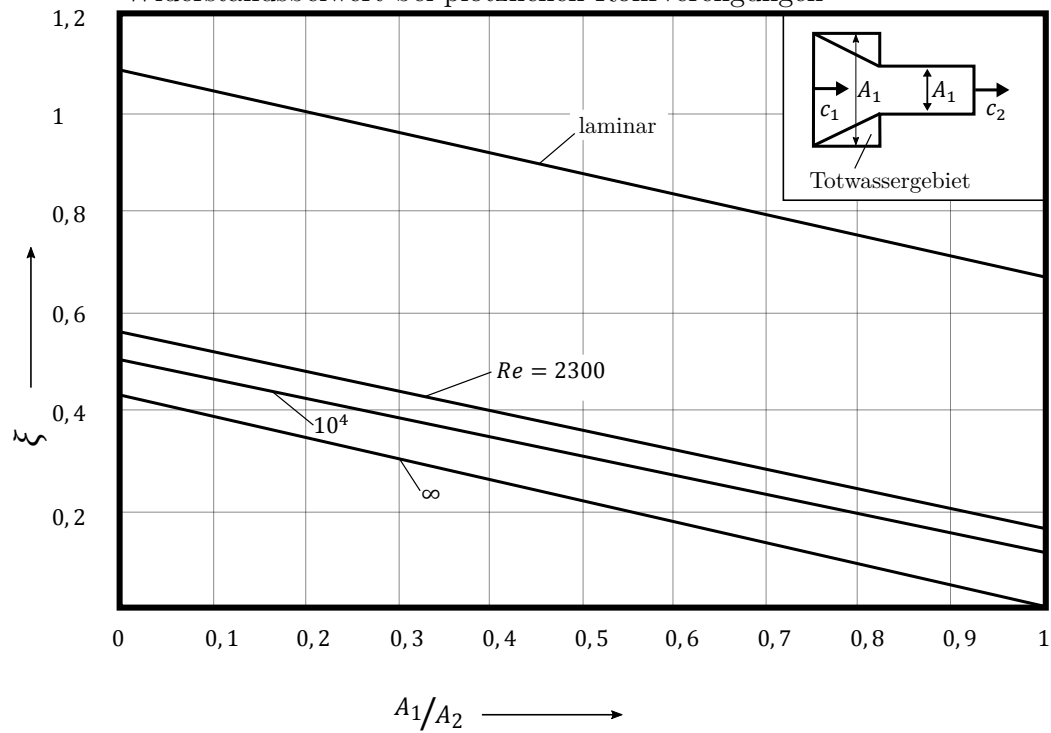


Widerstandsbeiwert bei 90° Krümmern



$$\xi = \xi_u \cdot f_{Re}$$

Widerstandsbeiwert bei plötzlichen Rohrverengungen



Zulässiger Öffnungswinkel bei Diffusoren

