I Grundgleichungen:

Massenstrom: $\boxed{\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}}$ $\boxed{\dot{m} = \rho \cdot A \cdot c}$ $\boxed{[\dot{m}] = \frac{kg}{s}}$

Volumenstrom: $\boxed{\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho}}$ $\boxed{\dot{V} = \dot{m} \cdot v}$ $\boxed{\dot{V} = A \cdot c}$ $\boxed{[\dot{V}] = \left[\frac{m^3}{s}\right]}$; v: spez. Volumen

Stetigkeitsgleichung: $\boxed{c_1 \cdot A_1 = c_2 \cdot A_2}$

Umrechnung: $\boxed{1bar = 10^5 \frac{N}{m^2} = 10^5 Pa}$ $\boxed{1mmWS = 9{,}80665\,Pa}$

dynamische Viskosität: $\boxed{\eta = \frac{F_R}{A} \cdot \frac{d}{c}}$ $\boxed{[\eta] = \frac{N\,s}{m^2}}$ F_R: Reibungskraft

kinematische Viskosität: $\boxed{\nu = \frac{\eta}{\rho}}$ $\boxed{[\nu] = \frac{m^2}{s}}$

Reynoldszahl: $\boxed{Re = \frac{c \cdot d}{\nu}}$ $\boxed{Re_{krit} = 2320}$

- $Re < 2320$: laminare Strömung $\Rightarrow$ $\boxed{\lambda_{lam} = \frac{64}{Re}}$
- $Re > 2320$: turbulente Strömung $\Rightarrow$ $\boxed{\frac{d}{k_s}}$ berechnen (k_s: Wandrauhigkeit) $\Rightarrow$ λ aus Diagramm:

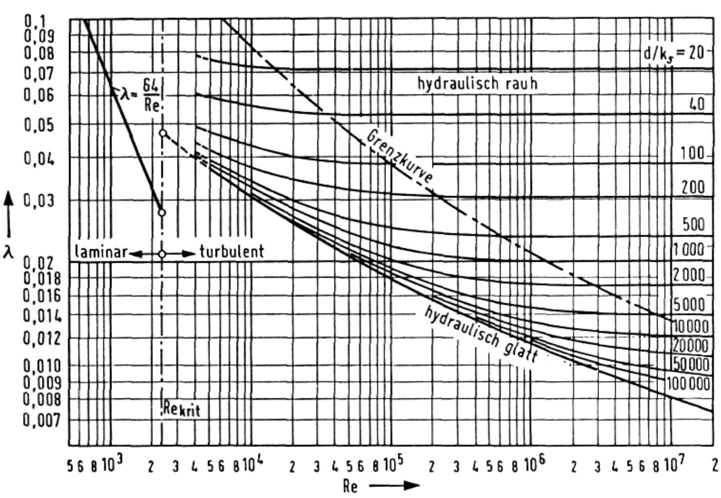


Bild 8-4 Moody-Diagramm[1)] für den Rohrwiderstandsbeiwert λ

Tabelle 8.3 Rauhigkeitswerte für Rohre

Rohr	k_s in mm
Glas; Kupfer oder Messing, gezogen	0,001–0,005
Faserzement (Eternit)	0,05–0,1
Stahlrohr, neu	0,02–0,1
Stahlrohr, gebraucht (rostig)	0,15–1,5
Betonrohre (mit üblichem Glattstrich)	0,3–0,8

Druckverluste durch Widerstände:

- Wandrauhigkeit: $$\Delta p_v = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d}$$
- Widerstände: $$\Delta p_v = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \cdot \sum \zeta$$

Druckverluste gesamt:

- c = const. : $$\Delta p_v = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \cdot \left(\sum \zeta + \lambda \cdot \frac{l}{d} \right)$$
- c ≠ const. : $$\Delta p_v = \frac{\rho}{2} \cdot \left(c_1^2 \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d} + c_2^2 \cdot \sum \zeta \right)$$

Druck :

$$p = \frac{F}{A}$$ $$p = \rho \cdot h \cdot g$$ $$[p] = \frac{N}{m^2} = Pa = 10^{-5} bar$$

Überdruck:

$$p_ü = p_a - p_0$$

Unterdruck:

$$p_u = p_0 - p_a$$

p_a : Absolutdruck
p_0 : Atmosphärendruck
$p_ü$: Überdruck
p_u : Unterdruck

Kraft infolge Druck:

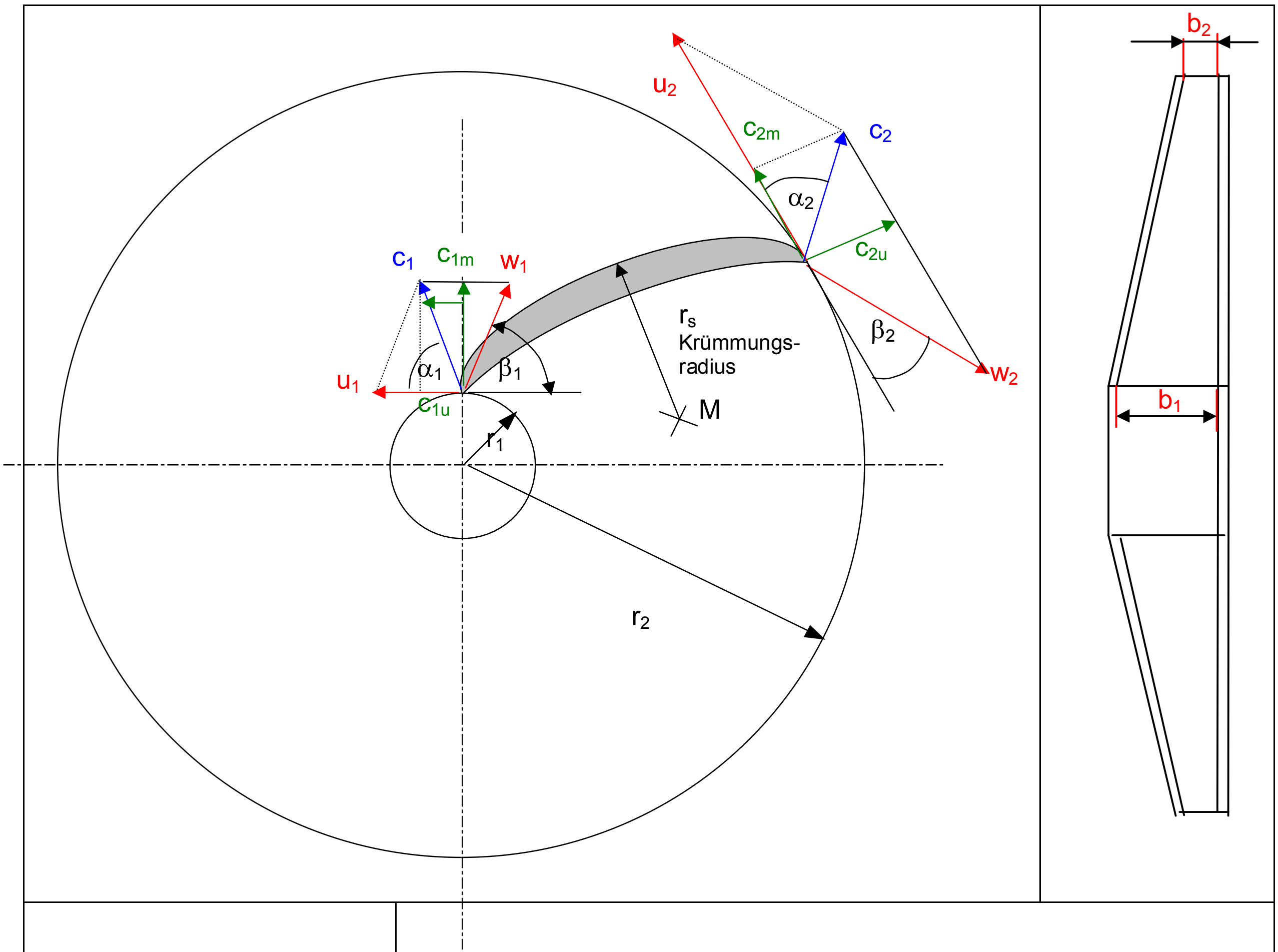
$$F = \rho \cdot g \cdot V$$

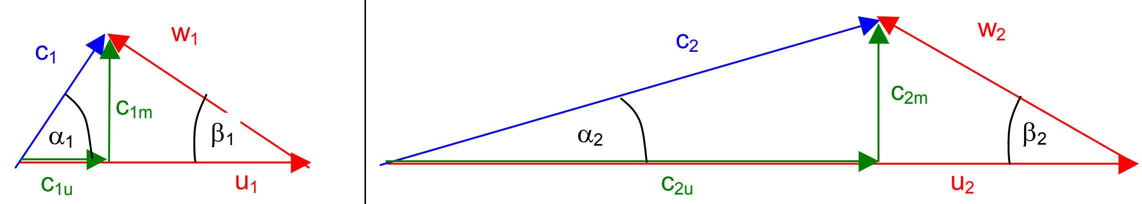
Bernoullische Gleichung:

- Energiegleichung: $$\frac{c_1^2}{2} + g \cdot h_1 + \frac{p_1}{\rho} + Y = \frac{c_2^2}{2} + g \cdot h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{\Delta p_v}{\rho}$$ Einheit: $\left[\frac{J}{kg}\right] = \left[\frac{Nm}{kg}\right] = \left[\frac{m^2}{s^2}\right]$
- Höhengleichung: $$\frac{c_1^2}{2 \cdot g} + h_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + H = \frac{c_2^2}{2 \cdot g} + h_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{\Delta p_v}{\rho \cdot g}$$ Einheit: $[m]$
- Druckgleichung: $$\rho \cdot \frac{c_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 + p_1 + \Delta p_t = \rho \cdot \frac{c_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_2 + p_2 + \Delta p_v$$ Einheit: $[Pa]$

II Pumpe

Geometrie:





$$u_1 = r_1 \cdot \omega = r_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

$$\vec{c}_1 = \vec{c}_{1u} + \vec{c}_{1m}$$

$$\beta_1 = \arctan \frac{c_{1m}}{u_1 - c_{1u}}$$

$$c_1 = \sqrt{c_{1m}^2 + c_{1u}^2}$$

$$\vec{c}_1 = \vec{u}_1 + \vec{w}_1$$

$$w_1 = \sqrt{c_{1m}^2 + (u_1 - c_{1u})^2}$$

$$\dot{V} = A_1 \cdot c_{1m}$$

$$A_1 = \pi \cdot D_1 \cdot b_1$$

$$u_2 = r_2 \cdot \omega = r_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

$$c_2 = \sqrt{c_{2m}^2 + c_{2u}^2}$$

$$\beta_2 = \arctan \frac{c_{2m}}{u_2 - c_{2u}}$$

$$\vec{c}_2 = \vec{c}_{2u} + \vec{c}_{2m}$$

$$\vec{c}_2 = \vec{u}_2 + \vec{w}_2$$

$$w_2 = \sqrt{c_{2m}^2 + (u_2 - c_{2u})^2}$$

$$\dot{V} = A_2 \cdot c_{2m}$$

$$A_2 = \pi \cdot D_2 \cdot b_2$$

wenn drallfrei (c_1 senkrecht):

$$w_1 = \sqrt{c_1^2 + u_1^2}$$

$$\tan \beta_1 = \frac{c_1}{u_1}$$

$$c_{2u} = \frac{Y_{th\infty}}{u_2}$$

Krümmungsradius r_s: $r_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_2 \cdot \cos\beta_2 - r_1 \cdot \cos\beta_1}$

3 Arbeitsanteile:

- kinetische Energie: $\boxed{W_{kin} = \frac{m}{2} \cdot \left(c_2^2 - c_1^2\right)}$
- Druckenergie: $\boxed{W_p = \frac{m}{2} \cdot \left(w_1^2 - w_2^2\right)}$
- Energie aus Fliehkraft: $\boxed{W_F = \frac{m}{2} \cdot \left(u_2^2 - u_1^2\right)}$

$$\boxed{Y_{th\infty} = \frac{1}{2} \cdot \left(\underbrace{u_2^2 - u_1^2 + w_1^2 - w_2^2}_{\text{statischer Anteil}} + \underbrace{c_2^2 - c_1^2}_{\text{kinetischer Anteil}}\right)}$$

drallfrei: c_1 ist radial gerichtet

$\Rightarrow Y_{th\infty} = u_2 \cdot c_{2u}$

spezifische Stutzenarbeit: $\boxed{Y = \frac{p_D - p_s}{\rho} + \frac{c_D^2 - c_s^2}{2} + g \cdot \Delta z_{d,s}}$ $\boxed{Y = H \cdot g}$ $\boxed{[Y] = \frac{J}{Kg} = \frac{Nm}{Kg} = \frac{m^2}{s^2}}$

Förderhöhe: $\boxed{H = \frac{Y}{g}}$ $\boxed{H = \frac{P}{\dot{m} \cdot g}}$ $\boxed{H = \frac{P}{\rho \cdot g \cdot \dot{V}}}$ $\boxed{[H] = m}$

Totaldruckerhöhung der Pumpe: $\boxed{\Delta p_t = \rho \cdot g \cdot H}$ $\boxed{\Delta p_t = \rho \cdot Y}$ $\boxed{\Delta p_t = \frac{P}{\dot{V}}}$ $\boxed{[\Delta p_t] = Pa}$

Energiezufuhr der Pumpe:

$$\boxed{p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot c_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_1 + \rho \cdot g \cdot H = p_2 + \frac{\rho}{2} \cdot c_2^2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + \Delta p_{v1,2} = \left[\frac{J}{kg}\right]}$$

- Druckverluste durch Rohrreibung und Widerstände:

1) c = const. $\boxed{\Delta p_v = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \cdot \left(\sum \zeta + \lambda \cdot \frac{l}{d}\right) ;\ c = \frac{\dot{V}}{A}}$

2) $c \neq$ const. $\boxed{\Delta p_v = \frac{\rho}{2} \cdot \left(c_1^2 \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d} + c_2^2 \cdot \sum \zeta\right)}$

$\boxed{[\Delta p_v] = Pa}$

λ: Rohrreibungszahl
ζ: Widerstandsbeiwert

Drehmoment am Laufrad: $\boxed{M = \dot{m} \cdot (c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1)}$

$\boxed{M = \dot{m} \cdot (F_{2u} \cdot r_2 - F_{1u} \cdot r_1)}$ $\boxed{F_u = \dot{m} \cdot (c_{2u} - c_{1u})}$ $\boxed{[M] = Nm}$

theoretisch aufgenommene Leistung am Laufrad: $\boxed{P_{th\infty} = M \cdot \omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n}$

theoretische Pumpenleistung: $\boxed{P_{th\infty} = \dot{m} \cdot (c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1)}$

maximale Leistung: $\boxed{c_{2u\,max} = 2 \cdot u_2}$ $\boxed{Y_{max} = g \cdot H_{max} = 2 \cdot u_2^2}$

$$\boxed{n = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot D} \cdot \sqrt{g \cdot H}}$$

Eulersche Pumpengleichung:

- reibungsfrei mit unendlich vielen Schaufeln: $Y_{th\infty} = \frac{P_{th\infty}}{\dot{m}} = u_2 \cdot c_{2u} - u_1 \cdot c_{1u}$
- drallfrei: $Y_{th\infty} = u_2 \cdot c_{2u}$
- reibungsfrei mit endlich vielen Schaufeln: $Y_{th} = \mu \cdot Y_{th\infty}$
- Reib- und Stoßbehaftet: $Y = \mu \cdot \eta \cdot Y_{th\infty}$

$$[Y] = \frac{J}{Kg} = \frac{Nm}{Kg} = \frac{m^2}{s^2}$$

Förderleistung:

$P = \dot{m} \cdot Y$ $\quad$ $P = \dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot H$

$P = \rho \cdot \dot{V} \cdot Y$ $\quad$ $P = \dot{V} \cdot \Delta p_t$

P: Förderleistung
η_V: volumetrischer Wirkungsgrad
η_t: totaler Wirkungsgrad
η_i: innerer Wirkungsgrad

Kupplungsleistung:

$p_K = \frac{P}{\eta_{ges}}$ $\quad$ $p_K = \frac{\rho \cdot Y \cdot \dot{V}}{\eta_{ges}}$ $\quad$ $p_K = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot \dot{V}}{\eta_{ges}}$ $\quad$ $p_K = \frac{\Delta p_t \cdot \dot{V}}{\eta_t}$

$p_K = \rho \cdot \frac{Y}{\eta_i} \cdot \frac{\dot{V}}{\eta_V}$ $\quad$ $p_K = \rho \cdot Y_{th} \cdot \dot{V}_{th} \cdot \frac{1}{\eta_{mech}}$ $\quad$ $p_K = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$

Gesamtwirkungsgrad:

$\eta_{ges} = \eta_t = \eta_i \cdot \eta_V \cdot \eta_{mech}$

Reaktionsgrad:

$r = \frac{Y_{stat\,th\infty}}{Y_{th\infty}}$ $\quad$ $r = 1 - \frac{Y_{kin\,th\infty}}{Y_{th\infty}}$ $\quad$ $r = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{c_{2u}}{u_2}$

$Y_{th\infty} = Y_{st\,th\infty} + Y_{kin\,th\infty}$

$Y_{st\,th\infty} = \frac{1}{2} \cdot \left(u_2^2 - u_1^2\right) + \frac{1}{2} \cdot \left(w_1^2 - w_2^2\right)$ $\quad$ $Y_{kin\,th\infty} = \frac{1}{2} \cdot \left(c_2^2 - c_1^2\right)$

$Y_{kin\,th\,\infty}$ muss in einem Diffusor durch Herabsetzung der Geschwindigkeit in statischen Druck umgesetzt werden $\Rightarrow$ mäßiger Wirkungsgrad
Daher ist ein guter Reaktionsgrad notwendig!!
Radialrad: hoher Druck, geringer Volumenstrom $\Rightarrow$ hoher Reaktionsgrad
Axialrad: geringer Druck, hoher Volumenstrom $\Rightarrow$ geringer Reaktionsgrad

Affinitätsgesetze:

1) Änderung von $\dot{V}; Y; P; p$ durch Änderung von n:

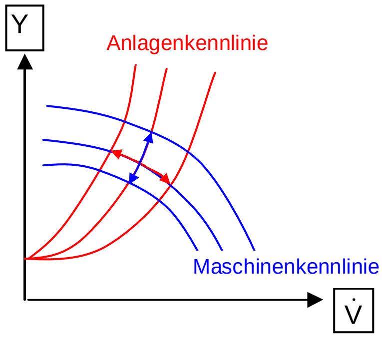
$$\boxed{\begin{aligned}\dot{V} &= A_2 \cdot c_{2m} \\ \dot{V}' &= A_2 \cdot c'_{2m}\end{aligned}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{\dot{V}'}{\dot{V}} = \frac{n'}{n}}$$

$$\boxed{\frac{Y'}{Y} = \frac{H'}{H} = \frac{\Delta p'_t}{\Delta p_t} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2}$$

$$\boxed{\begin{aligned}Y_{th\infty} &= u_2 \cdot c_{2u} \\ Y'_{th\infty} &= u'_2 \cdot c'_{2u}\end{aligned}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{Y'_{th\infty}}{Y_{th\infty}} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2}$$

$Y = \mu \cdot \eta_i \cdot Y_{th\infty}$; μ, η_i bleiben bei Drehzahländerung annähernd const.

$$\boxed{\begin{aligned}P &= \rho \cdot \dot{V} \cdot Y \\ P' &= \rho \cdot \dot{V}' \cdot Y'\end{aligned}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\frac{P'}{P} = \left(\frac{n'}{n}\right)^3}$$



$\Rightarrow$ Drosselkennlinie von einer Drehzahl auf eine andere umrechnen

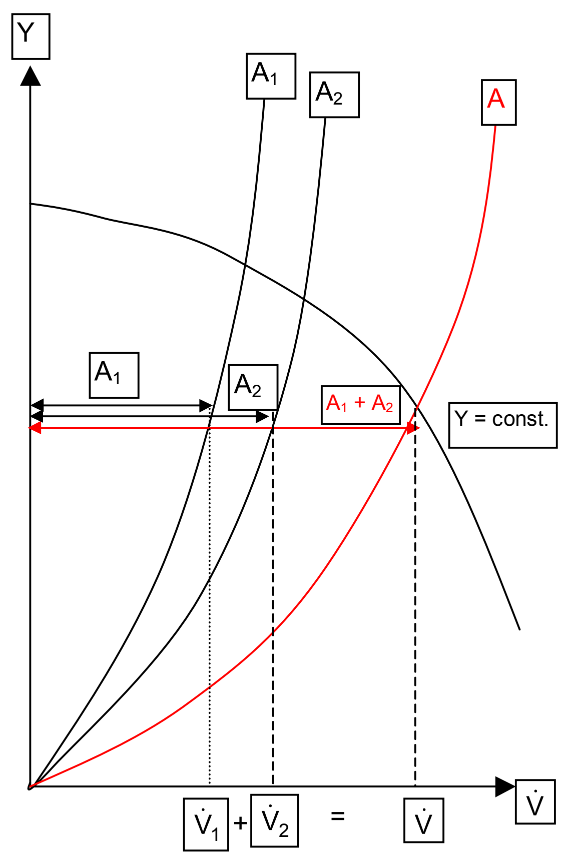
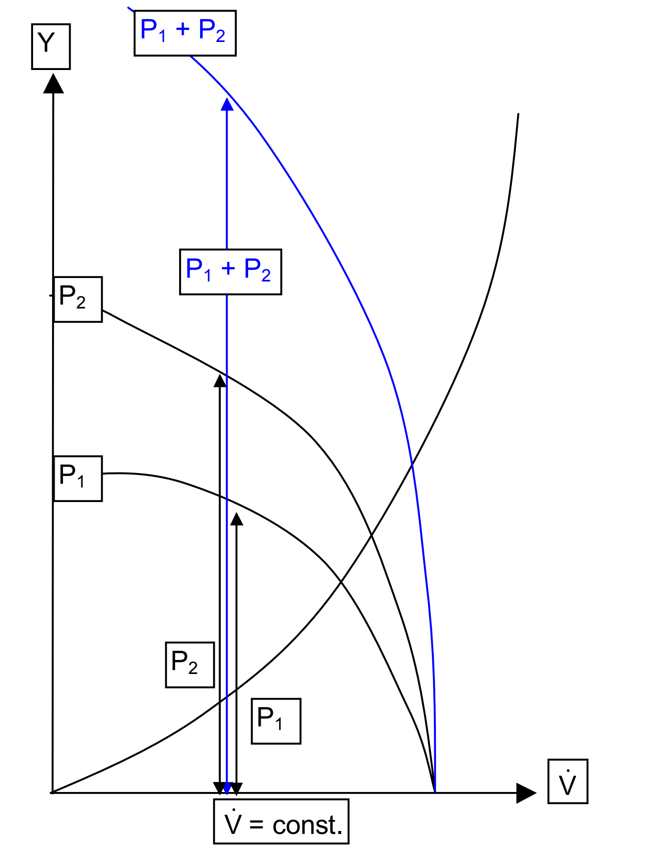
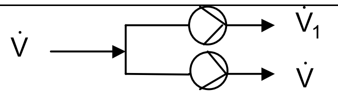
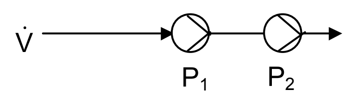
2) Änderung von D_2:

$$\boxed{\frac{\dot{V}'}{\dot{V}} = \left(\frac{D'_2}{D_2}\right)^3}$$

$$\boxed{\frac{Y'_{th\infty}}{Y_{th\infty}} = \left(\frac{D'_2}{D_2}\right)^2}$$

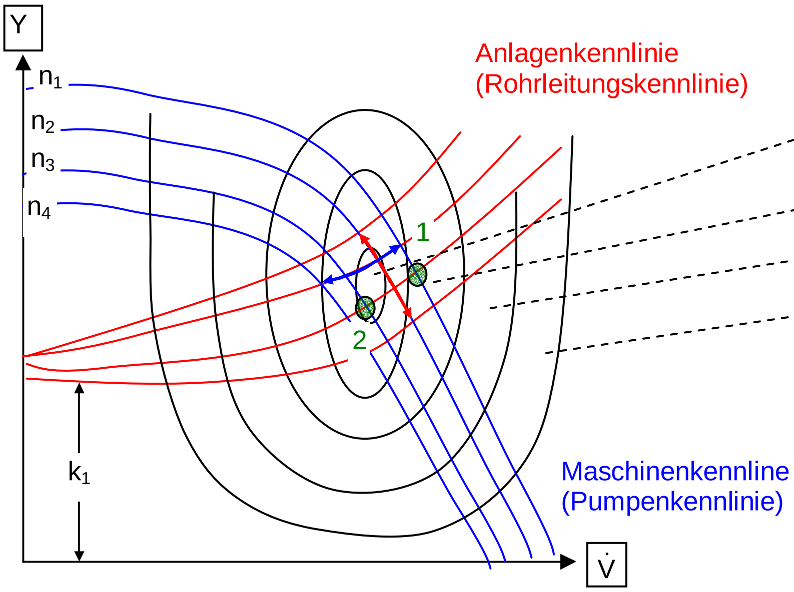
$$\boxed{\frac{P'}{P} = \left(\frac{D'_2}{D_2}\right)^5}$$

Parallel- und Hintereinanderschaltung von SAM:

<table>
<tr><th>Parallelschaltung</th><th>Hintereinanderschaltung</th></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \ldots + \dot{V}_i = \sum \dot{V}_i \quad \dot{V}_2$
$Y = \text{const.}$
$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} \sqrt{\frac{\zeta_2}{\zeta_1}} \qquad \zeta_{ges} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{\zeta_1}} + \frac{1}{\sqrt{\zeta_2}} + \ldots\right)^2}$</td><td>$Y = Y_1 + Y_2 + \ldots + Y_i = \sum Y_i$
$\dot{V} = \text{const.}$</td></tr>
</table>

Kennlinien:

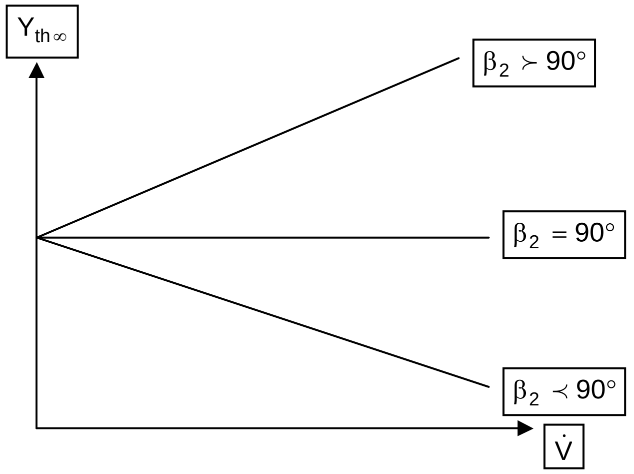
Anlagenkennlinie: (Muscheldiagramm)



- Anlagenkennlinie durch Widerstände beeinflussbar
- Maschinenkennlinie durch Drehzahl bzw. Laufradform beeinflussbar
- bei Δn wandert der Bezugspunkt von 1 nach 2 (Drehzahlregelung)
- Anlagenkennlinie: $$Y_A = \underbrace{\frac{p_2 - p_1}{\rho} + g \cdot (z_2 - z_1)}_{K_1} + \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \left(c_2^2 - c_1^2\right) + \frac{\Delta p_v}{\rho}}_{k_2 \cdot \dot{V}^2}, \text{ für Re} > 2320$$

$$Y_A = 128 \cdot \frac{\nu \cdot l}{\pi \cdot d^4} \cdot \dot{V}, \text{ für Re} < 2320$$

theoretische Drosselkurve:



$$\boxed{Y_{th\infty} = u_2^2 - \frac{u_2}{A_2 \cdot \tan\beta_2} \cdot \dot{V}}$$

$$\boxed{u_2 = D_2 \cdot \pi \cdot n}$$

$$\boxed{A_2 = D_2 \cdot b_2 \cdot \pi}$$

$$\boxed{\tan(\beta = 90°) = \infty}$$

Kavitation:

$NPSH_A$:

$$NPSH_A = \frac{p_1 - p_D}{\rho \cdot g} - \frac{c_1^2}{2 \cdot g} - z_s - \frac{\Delta p_{vs}}{\rho \cdot g}$$

$$\left[NPSH\right] = m$$

$$NPSH_A = \underbrace{\frac{p_0 - p_D}{\rho \cdot g}}_{K_1} - z_s - \underbrace{\frac{\Delta p_{vs}}{\rho \cdot g}}_{K_2 \cdot \dot{V}^2}$$

$$NPSH_A \succ NPSH_{erf}$$

$NPSH_A$: NPSH- Wert der Anlage

$NPSH_A$ = $NPSH_{vorh}$

$NPSH_R$ = $NPSH_{erf}$ = Minimalabstand

p_1: Druck an der Stelle 1

p_D: Dampfdruck = f (T; p)

Δp_{vs}: Druckverlust bis Saugstutzen

z_s: Höhenunterschied

$p_{s\,zul}$: Zul. Saugdruck an d. Stelle s

$p_{tot\,s\,zul}$: zul. Totaldruck am Stutzen

$p_{1ü\,erf}$: erforderliche Überdruck

$p_{1\,erf}$: erforderlicher Absolutdruck

p_0: Atmosphärendruck

zulässiger Saugdruck am Saugstutzen:

$$p_{s\,zul} = p_D + \rho \cdot g \cdot NPSH_{erf} - \frac{\rho}{2} \cdot c_s^2$$

zulässige Reibung durch Druckverlust:

$$\Delta p_{vs\,zul} = p_1 - p_D - \rho \cdot g \cdot NPSH_{erf} + \frac{\rho}{2} \cdot c_1^2 - \rho \cdot g \cdot z_s$$

zulässige Höhe:

$$z_{s\,zul} = \frac{p_1 - p_D}{\rho \cdot g} - NPSH_{erf} + \frac{c_1^2}{2 \cdot g} - \frac{\Delta p_{vs}}{\rho \cdot g}$$

erforderlicher Vordruck zum kavitationsfreiem Betrieb der Pumpe:

$$p_{1erf} = p_D + \rho \cdot g \cdot NPSH_{erf} - \frac{\rho}{2} \cdot c_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_s + \Delta p_{vs}$$

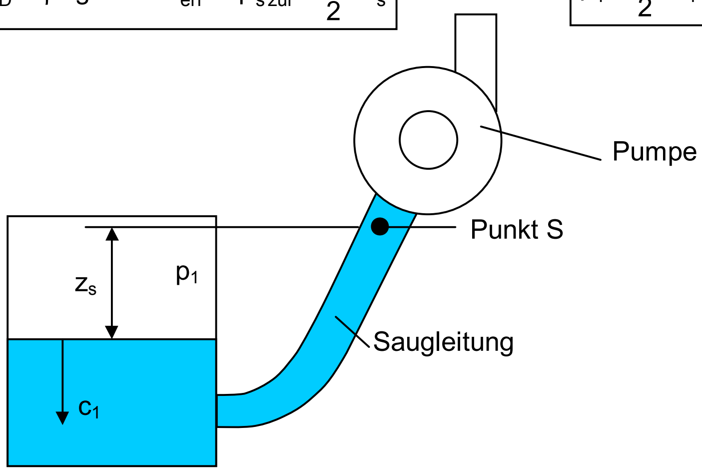
erforderlicher Überdruck:

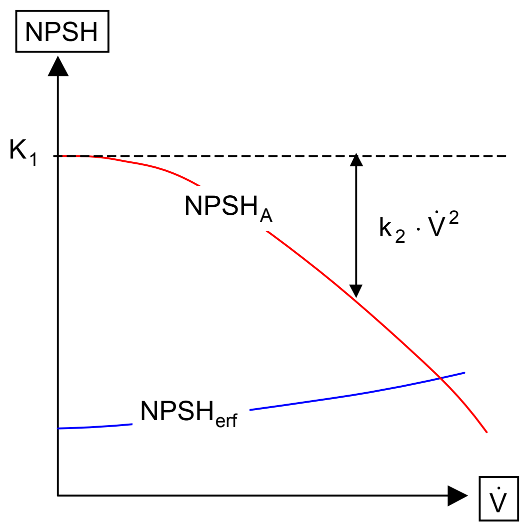
$$p_{1ü\,erf} = p_{1erf} - p_0$$

Energiegleichung:

$$p_D + \rho \cdot g \cdot NPSH_{erf} = p_{s\,zul} + \frac{\rho}{2} \cdot c_s^2$$

$$p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot c_1^2 = p_{s\,zul} + \frac{\rho}{2} \cdot c_s^2 + \rho \cdot g \cdot z_s + \Delta p_{vs}$$

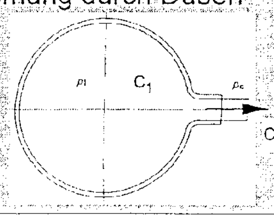
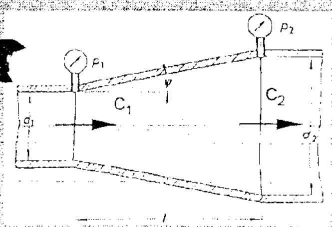




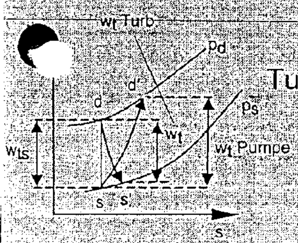
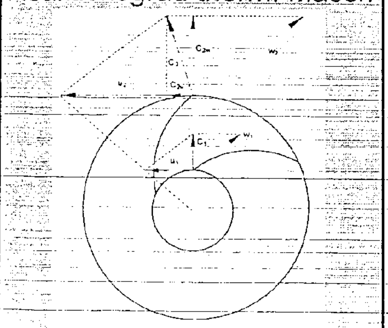
Fehlerberechnung

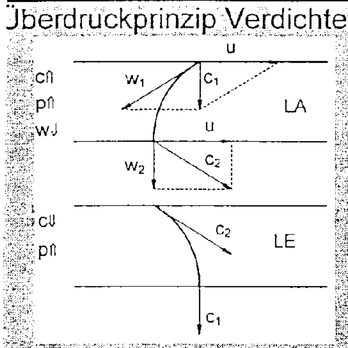
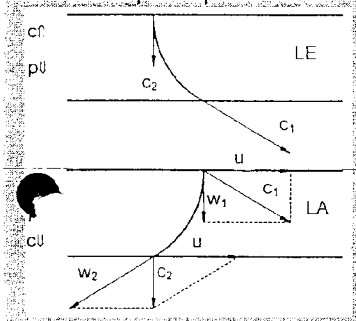
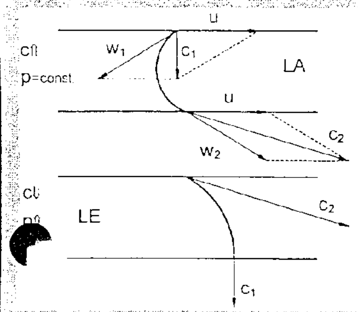
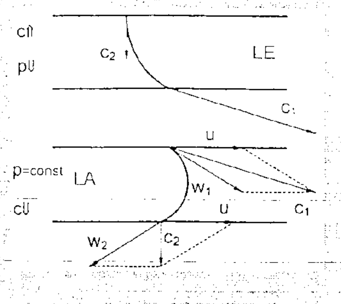
Fehlergrenzen bezogen auf den Endwert	$G = \pm \frac{Kl}{100} \cdot x_E$	G Kl x_E	Fehlergrenzen Klassengenauigkeit Endwert des Meßgerätes	%
Klassengenauigkeit	$Kl = \pm \frac{\lvert G \rvert}{x_E} \cdot 100\%$	G Kl x_E	Fehlergrenzen Klassengenauigkeit Endwert des Meßgerätes	%
Fehlergrenze bei hintereinanderschaltung von Meßger. G=±1 Digit =±0,1	Absolut: $G_y = \pm\sqrt{G_{y1}^2 + G_{y2}^2 + ... + G_{yn}^2}$ Relativ: $\frac{G_y}{y} = \pm \frac{G_y}{x_A} \cdot 100\%$	G_y $G_{y1,y2}$ G_y/y x_A	Gesamtfehlergr. b. Reihensch. Fehler pro Meßgerät Relative Fehler Meßwert (Leistung, Moment,.....) am Meßgerät (Ausgangsgröße)	
relativer Fehler	$\frac{G_x}{x} = \pm 1\% = \pm 10^{-2}$			

Strömungsarten

Strömung durch Düsen 	$h_1 + q + w_t + \frac{1}{2} \cdot c_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} \cdot c_2^2$ wenn Isentrop: $q = 0$ keine techn. Arbeit vorh. $w_t = 0$ Behälter groß gegenüber Düse $c_1 = 0$ $\Rightarrow \quad c_2 = \sqrt{2 \cdot (h_1 - h_2)}$	q c_1 c_2 h_1 h_2 w_t	Wärmezufuhr bzw. -abfuhr Geschw. im Behälter Geschw. an der Düse Enthalpie im Behälter Enthalpie an der Düse Technische Arbeit	J/kg m/s m/s J/kg J/kg J/kg
Strömung durch Diffusor  Isentrope Verdichtung:	$h_1 + q + w_t + \frac{1}{2} \cdot c_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} \cdot c_2^2$ wenn Isentrop: $q = 0$ keine techn. Arbeit vorh. $w_t = 0$ $\Rightarrow \quad h_2 - h_1 = \Delta h = \frac{1}{2} \cdot (c_1^2 - c_2^2)$ $\dot{m} = A_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 = A_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2$ $\Delta h = c_p \cdot \Delta T \quad ; \quad T_2 = T_1 + \Delta T$ $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$	q c_1 c_2 $\rho_{1,2}$ h_1 h_2 w_t A_1 A_2 T_1 T_2 p_1 p_2 c_p κ	Wärmezufuhr bzw. -abfuhr Geschw. Stelle 1 Geschw. Stelle 2 Dichte Stelle 1 bzw. 2 Enthalpie Stelle 1 Enthalpie Stelle 2 Technische Arbeit Querschnitt Stelle 1 Querschnitt Stelle 2 Temperatur Stelle 1 Temperatur Stelle 2 Druck Stelle 1 Druck Stelle 2 Spez. Wärmekapazität Isentropenexponent	J/kg m/s m/s kg/m³ J/kg J/kg J/kg m² m² K K bar bar kJ/kg·K 1

Thermische Maschinen

Spez. Stutzenarbeit Bei Gasen $g \cdot \Delta z \approx 0$ $1\ J = 1 Nm$	$Y=\left(u_d+\frac{p_d}{\rho}\right)-\left(u_s+\frac{p_s}{\rho}\right)+\frac{c_d^2-c_s^2}{2}-q+g\cdot\Delta z_{d,s}$ $Y=\left(h_d+\frac{c_d^2}{2}\right)-\left(h_s+\frac{c_s^2}{2}\right)-q$ $Y=w_t+\frac{c_d^2-c_s^2}{2}$	Y p_d p_s c_d c_s ρ Δz u_d u_s q h_d h_s w_t	spez. Stutzenarbeit Druck am Druckstutzen Druck am Saugstutzen mittlere Geschw. am Druckst. mittlere Geschw. am Saugst. Dichte Höhendifferenz zw. Saug+Drst. Innere Energie Druckstutzen Innere Energie Saugstutzen Wärmezufuhr bzw. –abfuhr Enthalpie Druckstutzen Enthalpie Saugstutzen Technische Arbeit	J/kg N/m² N/m² m/s m/s kg/m³ m J/kg J/kg J/kg J/kg J/kg J/kg
Enthalpie	$h_d = h_s + q + w_t$	q h_d h_s w_t	Wärmezufuhr bzw. –abfuhr Enthalpie Druckstutzen Enthalpie Saugstutzen Technische Arbeit	J/kg J/kg J/kg J/kg
Techn. Arbeit Verdichter Turbine:  	Isentrop q=0: Kompression: $w_t=\frac{h_d-h_s}{\eta_i}=\frac{w_{ts}}{\eta_i}$ Expansion: $w_t = w_{ts}\cdot\eta_i$ isotherm T=const. ($h_d = h_s$ =const) $w_t = R\cdot T\cdot \ln\left(\frac{p_d}{p_s}\right)$	w_t w_{ts} h_d h_s η_i R T p_d p_s	Technische Arbeit Isentrope techn. Arbeit Enthalpie Druckstutzen Enthalpie Saugstutzen Innerer Wirkungsgrad Spezielle Gaskonstante Abs. Temperatur Druck am Druckstutzen Druck am Saugstutzen	J/kg J/kg J/kg J/kg 1 J/kg K K N/m² N/m²
Innerer Wirkungsgrad	Verdichter: $\eta_i=\frac{h_d-h_s}{h_{d'}-h_s}$ Turbine: $\eta_i=\frac{h_d-h_{s'}}{h_d-h_s}$	η_i h_d h_s $h_{d'}$ $h_{s'}$	Innerer Wirkungsgrad Enthalpie Druckstutzen Enthalpie Saugstutzen Wirkl. Enthalpie Druckstutzen Wirkl. Enthalpie Saugstutzen	1 J/kg J/kg J/kg J/kg
Spez. Stutzenarbeit Isentrop q=0; $c_d \approx c_s$	$Y_{th\infty} = w_t = \Delta h_{LA} + \Delta h_{LE}$	w_t Δh_{LA} Δh_{LE} $Y_{th\infty}$	Technische Arbeit Enthalpie Laufrad Enthalpie Leiteinrichtung Spez. Stutzenarbeit	J/kg J/kg J/kg J/kg
Enhalpie-Zuwachs (Pumpe) -Abnahme (Turb.) am Laufrad	$\Delta h_{LA} = h_2 - h_1$ $\Delta h_{LA} = \frac{1}{2}\cdot(u_2^2-u_1^2)+\frac{1}{2}\cdot(w_1^2-w_2^2)$	Δh_{LA} h_1 h_2 u_1 u_2 w_1 w_2	Enthalpie Laufrad Enthalpie Eintritt Enthalpie Austritt Umfangsgeschw. Eintritt Umfangsgeschw. Austritt Relativgeschw. Eintritt Relativgeschw. Austritt	J/kg J/kg J/kg m/s m/s m/s m/s
Enhalpie Leiteinrichtung Strömung wird abgebremst	$\Delta h_{LE} = \frac{1}{2}\cdot(c_2^2-c_1^2)$	Δh_{LE} c_1 c_2	Enthalpie Leiteinrichtung Absolutgeschw. Eintritt Absolutgeschw. Austritt	J/kg m/s m/s
Reaktionsgrad therm. Masch 	$r = \frac{\Delta h_{LA}}{w_t}$ r > 0,5 Hochdruckräder (Radialkreiselpumpe, Kompressor) r = 0.5 Turbinenräder ($u_2 = c_{2u}$) r < 0,5 Niederdruckräder (Ventilator)	r Δh_{LA} w_t	Reaktionsgrad Enthalpie Laufrad Technische Arbeit	1 J/kg J/kg

Axiales Prinzip				
Überdruckprinzip Verdichter  $c_1 = w_2 \Rightarrow r = 0{,}5$	zugeführte Arbeit (+) $Y_{stat.th\infty} = \Delta h_{LA} = \frac{1}{2}\cdot\left(w_1^2 - w_2^2\right)$ $Y_{kin.th\infty} = \Delta h_{LE} = \frac{1}{2}\cdot\left(c_2^2 - c_1^2\right)$ $r = \frac{Y_{stat.th\infty}}{Y_{th\infty}} = \frac{Y_{stat.th\infty}}{Y_{kin.th\infty} + Y_{stat.th\infty}}$ $r = \frac{\Delta h_{LA}}{\Delta h_{LA} + \Delta h_{LE}}$	Δh_{LA} Δh_{LE} r c_1 c_2 w_1 w_2 u $Y_{th\infty}$ $Y_{st\,th\infty}$ $Y_{ki\,th\infty}$	spez. Enthalpie Laufrad spez. Enthalpie Leitrad (fest) Reaktionsgrad Absolutgeschw. Eintritt LA Absolutgeschw. Austritt LA Relativgeschw. Eintritt LA Relativgeschw. Austritt LA Umfangsgeschw. Laufrad theo. spez. Stutzenarbeit statischer Anteil kinetischer Anteil	J/kg J/kg 1 m/s m/s m/s m/s m/s J/kg J/kg J/kg
Überdruckprinzip Turbine  $c_2 = w_1 \Rightarrow r = 0{,}5$	abgeführte Arbeit (-) $Y_{stat.th\infty} = \Delta h_{LA} = \frac{1}{2}\cdot\left(w_1^2 - w_2^2\right)$ $Y_{kin.th\infty} = \Delta h_{LE} = \frac{1}{2}\cdot\left(c_2^2 - c_1^2\right)$ $r = \frac{Y_{stat.th\infty}}{Y_{th\infty}} = \frac{Y_{stat.th\infty}}{Y_{kin.th\infty} + Y_{stat.th\infty}}$ $r = \frac{\Delta h_{LA}}{\Delta h_{LA} + \Delta h_{LE}}$	Δh_{LA} Δh_{LE} r c_1 c_2 w_1 w_2 u $Y_{th\infty}$ $Y_{st\,th\infty}$ $Y_{ki\,th\infty}$	spez. Enthalpie Laufrad spez. Enthalpie Leitrad (fest) Reaktionsgrad Absolutgeschw. Eintritt LA Absolutgeschw. Austritt LA Relativgeschw. Eintritt LA Relativgeschw. Austritt LA Umfangsgeschw. Laufrad theo. spez. Stutzenarbeit statischer Anteil kinetischer Anteil	J/kg J/kg 1 m/s m/s m/s m/s m/s J/kg J/kg J/kg
Gleichdruckprinzip Verdichter  $w_1 = w_2 \rightarrow r = 0$	zugeführte Arbeit (+) $Y_{stat.th\infty} = \Delta h_{LA} = \frac{1}{2}\cdot\left(w_1^2 - w_2^2\right) = 0$ $Y_{kin.th\infty} = \Delta h_{LE} = \frac{1}{2}\cdot\left(c_2^2 - c_1^2\right) = w_t$ $r = \frac{Y_{stat.th\infty}}{Y_{th\infty}} = \frac{Y_{stat.th\infty}}{Y_{kin.th\infty} + Y_{stat.th\infty}} = 0$ $r = \frac{\Delta h_{LA}}{\Delta h_{LA} + \Delta h_{LE}} = 0$ für Verdichtung unsinnig, da η wegen der hohen Strömungsverluste in LA und im LE gering ist.	Δh_{LA} Δh_{LE} r c_1 c_2 w_1 w_2 u $Y_{th\infty}$ $Y_{st\,th\infty}$ $Y_{ki\,th\infty}$	spez. Enthalpie Laufrad spez. Enthalpie Leitrad (fest) Reaktionsgrad Absolutgeschw. Eintritt LA Absolutgeschw. Austritt LA Relativgeschw. Eintritt LA Relativgeschw. Austritt LA Umfangsgeschw. Laufrad theo. spez. Stutzenarbeit statischer Anteil kinetischer Anteil	J/kg J/kg 1 m/s m/s m/s m/s m/s J/kg J/kg J/kg
Gleichdruckprinzip Turbine  $w_1 = w_2 \Rightarrow r = 0$	abgeführte Arbeit (-) $Y_{stat.th\infty} = \Delta h_{LA} = \frac{1}{2}\cdot\left(w_1^2 - w_2^2\right) = 0$ $Y_{kin.th\infty} = \Delta h_{LE} = \frac{1}{2}\cdot\left(c_2^2 - c_1^2\right) = w_t$ $r = \frac{Y_{stat.th\infty}}{Y_{th\infty}} = \frac{Y_{stat.th\infty}}{Y_{kin.th\infty} + Y_{stat.th\infty}} = 0$ $r = \frac{\Delta h_{LA}}{\Delta h_{LA} + \Delta h_{LE}} = 0$	Δh_{LA} Δh_{LE} r c_1 c_2 w_1 w_2 u $Y_{th\infty}$ $Y_{st\,th\infty}$ $Y_{ki\,th\infty}$	spez. Enthalpie Laufrad spez. Enthalpie Leitrad (fest) Reaktionsgrad Absolutgeschw. Eintritt LA Absolutgeschw. Austritt LA Relativgeschw. Eintritt LA Relativgeschw. Austritt LA Umfangsgeschw. Laufrad theo. spez. Stutzenarbeit statischer Anteil kinetischer Anteil	J/kg J/kg 1 m/s m/s m/s m/s m/s J/kg J/kg J/kg
spez. Arbeit Turbine: abgeführte Arbeit (-) Verdichter: zugeführte Arbeit (+)	$w_t = Y_{th\infty} = Y_{kin\,th\infty} + Y_{stat.th\infty}$ $w_t = \Delta h_{LA} + \Delta h_{LE}$			