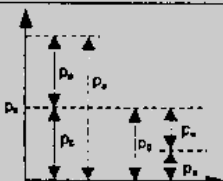


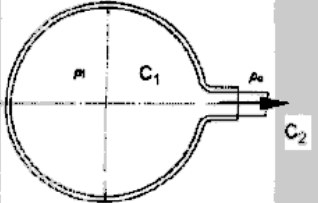
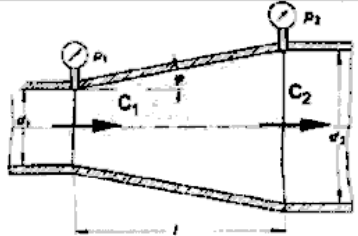
Hauptbetriebsdaten von Strömungsmaschinen

Massenstrom	$\dot{m} = \frac{m}{\tau} = \rho \cdot \dot{V}$	\dot{m} m τ	Massenstrom Masse Zeit	kg/s kg s
Volumensstrom	$\dot{V} = \frac{V}{\tau} = \frac{m}{\rho} = \dot{m} \cdot v$	\dot{V} V τ ρ v \dot{m}	Volumenstrom Volumen Zeit Dichte des Mediums spezifisches Volumen Massenstrom	m ³ /s m ³ s kg/m ³ m ³ /kg kg/s
Kontinuitätsgleichung	$\dot{V} = A \cdot c$	\dot{V} A c	Volumenstrom Querschnittsfläche mittlere Geschwindigkeit	m ³ /s m ² m/s
Stetigkeitsgleichung	$c_1 \cdot A_1 = c_2 \cdot A_2$	$c_{1,2}$ $A_{1,2}$	Geschw. Rohrdm 1 oder 2 Querschnittsfl. Rohrdm 1 o. 2	m/s m ²
Strömung mit Energiezufuhr bzw. -abfuhr				
Energiezufuhr (Pumpe) 1 bar = 10 ⁵ N/m ² = 10 ⁵ Pa N·m/kg = m ² /s ² = J/kg	$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot c_1^2 + g \cdot z_1 + Y =$ $\frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot c_2^2 + g \cdot z_2 + \frac{\Delta p_{v12}}{\rho}$	$p_{1,2}$ $c_{1,2}$ $z_{1,2}$ Δp_{v12} ρ g Y	statischer Druck Stelle 1 bzw. 2 Geschwindigkeit Stelle 1 bzw. 2 Höhe Stelle 1 bzw. 2 Druckverlust durch Reibung Dichte der Flüssigkeit Erdbeschleunigung 9,81 Spezifische Stutzenarbeit	N/m ² m/s m N/m ² kg/m ³ m/s ² J/kg
Energieabfuhr (Turbine) von Stelle 1 (oben) nach Stelle 2 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> $Y = \underbrace{g \cdot \Delta z}_{\text{Höhe}} - \underbrace{\frac{\Delta p_{v12}}{\rho}}_{\text{Reibungsverlust}}$ </div>	$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot c_1^2 + g \cdot z_1 - Y =$ $\frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot c_2^2 + g \cdot z_2 + \frac{\Delta p_{v12}}{\rho}$	$p_{1,2}$ $c_{1,2}$ $z_{1,2}$ Δp_{v12} ρ g Y	statischer Druck Stelle 1 bzw. 2 Geschwindigkeit Stelle 1 bzw. 2 Höhe Stelle 1 bzw. 2 Druckverlust durch Reibung Dichte der Flüssigkeit Erdbeschleunigung 9,81 Spezifische Stutzenarbeit	N/m ² m/s m N/m ² kg/m ³ m/s ² J/kg
Druckverlust durch Reibung im Rohr und Ventile, Krümmer	bei $c = \text{const.}$ $\Delta p_v = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{c^2}{c^2 \cdot \frac{v^2}{A^2}} \cdot \left(\sum \zeta + \lambda \cdot \frac{l}{d} \right)$ bei $c \neq \text{const.}$ $\Delta p_v = \frac{\rho}{2} \cdot \left(c_1^2 \cdot \lambda \cdot \frac{l}{d} + c_2^2 \cdot \sum \zeta \right)$	Δp_v ρ c λ ζ d l	Druckverlust Dichte der Flüssigkeit Mittlere Geschw. $c = v/A$ Rohrreibungszahl Widerstandsbeiwert Rohrdurchmesser Rohrlänge	N/m ² kg/m ³ m/s 1 1 m m
Förderhöhe <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> $H_{\text{zul}} = \frac{P}{\rho \cdot g}$ </div>	$H = \frac{Y}{g} = \frac{P}{\dot{m} \cdot g}$	H Y g P \dot{m}	Förderhöhe / Fallhöhe Spezifische Stutzenarbeit Erdbeschleunigung 9,81 Förderleistung Massenstrom	m J/kg m/s ² W kg/s
Überdruck 	$p_u = p_a - p_0$	p_u p_a p_0	Überdruck Absolutdruck (statischer Druck) Atmosphärendruck	N/m ² N/m ² N/m ²
Unterdruck	$p_u = p_0 - p_a$	p_u p_a p_0	Unterdruck Absolutdruck (statischer Druck) Atmosphärendruck	N/m ² N/m ² N/m ²
spez. Stutzenarbeit Kreiselpumpe spez. Stutzenarbeit Wasserturbine	$Y = \frac{p_d - p_s}{\rho} + \frac{c_d^2 - c_s^2}{2} + g \cdot \Delta z_{d,s}$ $Y = \frac{p_d - p_s}{\rho} + \frac{c_d^2 - c_s^2}{2} + g \cdot \Delta z_{d,s}$	Y p_d p_s c_d c_s ρ Δz	spez. Stutzenarbeit Druck am Druckstutzen Druck am Saugstutzen mittlere Geschw. am Druckst. mittlere Geschw. am Saugst. Dichte Höhendifferenz zw Saug+Drst.	J/kg N/m ² N/m ² m/s m/s kg/m ³ m
Totaldruckerhöhung Ventilatoren	$\Delta p_t = \rho \cdot g \cdot H = \rho \cdot Y = \frac{P}{\dot{V}}$	Δp_t ρ g H Y P \dot{V}	Totaldruckerhöhung Dichte Erdbeschl. Förderhöhe spez. Stutzenarbeit Förderleistung Volumenstrom	N/m ² kg/m ³ m/s ² m J/kg W m ³ /s

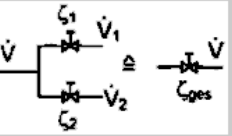
Leistung

Förderleistung (hydr. Leistung)	$P = \dot{m} \cdot Y$ $P = \rho \cdot \dot{V} \cdot Y = \dot{V} \cdot \Delta p_t$ $P = \dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot H$	P \dot{m} Y \dot{V} ρ Δp_t H	Förderleistung Massenstrom spez. Stutzenarbeit Volumenstrom Dichte Totaldruckerhöhung Förderhöhe	W kg/s J/kg m ³ /s kg/m ³ N/m ² m
Kupplungsleistung Antriebsleistung Pumpe, Ventilator	$P_K = \frac{P}{\eta_{ges}} = \frac{\rho \cdot Y \cdot \dot{V}}{\eta_{ges}} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot \dot{V}}{\eta_{ges}}$ $P_K = \rho \cdot \frac{Y}{\eta_l} \cdot \frac{\dot{V}}{\eta_v} = \rho \cdot Y_m \cdot \dot{V}_m \cdot \frac{1}{\eta_m}$ $P_K = \frac{\Delta p_t \cdot \dot{V}}{\eta_l}$ $P_K = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$	P _K P \dot{m} Y \dot{V} ρ H \dot{V} Δp_t η_l M n	Kupplungsleistung Förderleistung Massenstrom spez. Stutzenarbeit Volumenstrom Dichte Förderhöhe Volumenstrom Totaldruckerhöhung Totaler Wirkungsgrad Stationäres Motormoment Drehzahl Motor	W W kg/s J/kg m ³ /s kg/m ³ m m ³ /s N/m ² 1 Nm 1/s
Gesamtwirkungsgrad	$\eta_{ges} = \eta_l = \eta_l \cdot \eta_v \cdot \eta_m$	η_{ges} η_l η_l η_v η_m	Gesamtwirkungsgrad Totaler Wirkungsgrad Innerer Wirkungsgrad 0,8-0,9 Volumetrischer Wk. 0,95-0,98 Mech. Wk 0,94-0,98	1 1 1 1 1

Strömungsarten

Strömung durch Düsen 	$h_1 + q + w_1 + \frac{1}{2} \cdot c_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} \cdot c_2^2$ wenn Isentrop: q = 0 keine techn. Arbeit vorh. w ₁ = 0 Behälter groß gegenüber Düse c ₁ = 0 $\Rightarrow c_2 = \sqrt{2 \cdot (h_1 - h_2)}$	q c ₁ c ₂ h ₁ h ₂ w ₁	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  <p style="margin-top: 10px;">Isentrope Verdichtung:</p>	$h_1 + q + w_1 + \frac{1}{2} \cdot c_1^2 = h_2 + \frac{1}{2} \cdot c_2^2$ wenn Isentrop: q = 0 keine techn. Arbeit vorh. w ₁ = 0 $\Rightarrow h_2 - h_1 = \Delta h = \frac{1}{2} \cdot (c_1^2 - c_2^2)$ $\dot{m} = A_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 = A_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2$ $\Delta h = c_p \cdot \Delta T ; T_2 = T_1 + \Delta T$ $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$	q c ₁ c ₂ ρ _{1,2} h ₁ h ₂ w ₁ 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/m ³ J/kg J/kg J/kg m ² m ² K K bar bar kJ/kg·K 1

Schaltung von Widerständen

Reihenschaltung	$\zeta_{ges} = \zeta_1 + \zeta_2 + \dots + \zeta_n$	ζ	Widerstandsbeiwert	1
Parallelschaltung 	$\zeta_{ges} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\sqrt{\zeta_1}} + \frac{1}{\sqrt{\zeta_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{\zeta_n}} \right)^2}$	ζ	Widerstandsbeiwert	1

Drosselkennlinie = Maschinenkennlinie

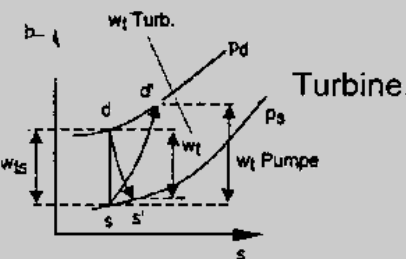
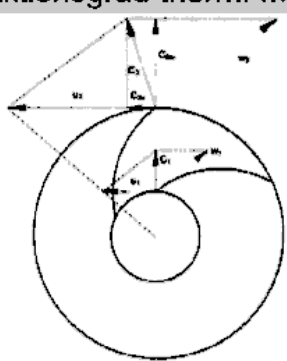
<p>Theoretische Drosselkurve</p>	<p>Gilt nur für $\beta_2 < 90^\circ$</p> $Y_{th\infty} = u_2^2 - \frac{u_2}{A_2 \cdot \tan \beta_2} \cdot \dot{V}$ $u_2 = D_2 \cdot \pi \cdot n$ $A_2 = D_2 \cdot b_2 \cdot \pi$	<p>$Y_{th\infty}$ theo. spez. Stutzenarb. ∞-Sch.</p> <p>u_2 Umfangsgeschw. LA-außendm</p> <p>A_2 Austrittsfläche</p> <p>\dot{V} Volumenstrom</p> <p>β_2 Schaufelaustrittswinkel</p> <p>D_2 Laufradaußendurchmesser</p> <p>n Drehzahl Laufrad</p> <p>b_2 Laufradaustrittsbreite</p>	<p>J/kg</p> <p>m/s</p> <p>m²</p> <p>kg/m³</p> <p>°</p> <p>m</p> <p>1/s</p> <p>m</p>
<p>Anlagen-Kennlinie</p>	$Y_A = \frac{p_2 - p_1 + \rho \cdot g \cdot (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot c_2^2 - \rho \cdot c_1^2) + \Delta p_{v12}}{\rho}$ $Y_A = K_1 + K_2 \cdot \dot{V}^2$ <p>Für $Re < 2320$ gilt: \rightarrow Laminare Strömung</p> $Y_A = 128 \cdot \frac{v \cdot l}{\pi \cdot d^4} \cdot \dot{V}$	<p>$p_{1,2}$ statischer Druck Stelle 1 bzw. 2</p> <p>$c_{1,2}$ Geschwindigkeit Stelle 1 bzw. 2</p> <p>$z_{1,2}$ Höhe Stelle 1 bzw. 2</p> <p>Δp_{v12} Druckverlust durch Reibung</p> <p>ρ Dichte der Flüssigkeit</p> <p>g Erdbeschleunigung 9,81</p> <p>Y_A Spez. Energie der Anlage</p> <p>K_1 Konstante fest durch Reib.+Wid.</p> <p>K_2 Konstante abh. von Volumenstr.</p> <p>\dot{V} Volumenstrom</p> <p>v Viskosität</p>	<p>N/m²</p> <p>m/s</p> <p>m</p> <p>N/m²</p> <p>kg/m³</p> <p>m/s²</p> <p>J/kg</p> <p></p> <p></p> <p></p> <p>m³/s</p> <p>m²/s</p>

Affinitätsgesetze für SMA

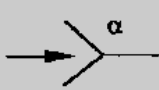
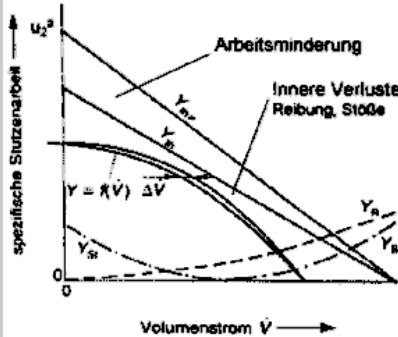
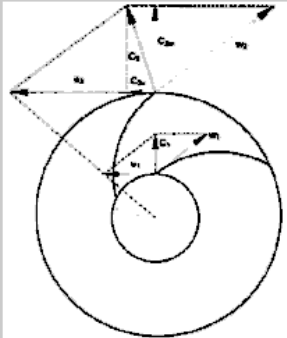
<p>Volumenstrom</p>	$\frac{\dot{V}}{\dot{V}'} = \frac{n}{n'}$	<p>\dot{V} Volumenstr. vor Drehzahländ.</p> <p>\dot{V}' Volumenstr. nach Drehzahländ</p> <p>n Aktive Drehzahl</p> <p>n' Drehzahländerung</p>	<p>m³/s</p> <p>m³/s</p> <p>1/min</p> <p>1/min</p>
<p>Spez. Stutzenarbeit</p> <p>Für $\rho = \text{const.}$</p>	$\frac{Y_{th\infty}}{Y'_{th\infty}} = \frac{Y}{Y'} = \frac{H}{H'} = \frac{\Delta p_t}{\Delta p'_t} = \left(\frac{n}{n'}\right)^2$	<p>$Y_{th\infty}$ theo. spez. Stutzenarb. ∞-Sch.</p> <p>$Y'_{th\infty}$ theo. spez. Stutzenarb. ∞-Sch.</p> <p>H Förderhöhe vorher</p> <p>H' Förderhöhe nachher</p> <p>n Aktive Drehzahl</p> <p>n' Drehzahländerung</p>	<p>J/kg</p> <p>J/kg</p> <p>m</p> <p>m</p> <p>1/min</p> <p>1/min</p>
<p>Förderleistung, hydr. Leist.</p> <p>$\cdot \eta$ Kupplungsleistung</p> <p>Für $\rho = \text{const.}$ und $\eta_{ges} = \eta'_{ges}$</p>	$\frac{P}{P'} = \frac{P_K}{P'_K} = \left(\frac{n}{n'}\right)^3$	<p>P Förderleistung vorher</p> <p>P' Förderleistung nachher</p> <p>P_K Kupplungsleistung vorher</p> <p>P'_K Kupplungsleistung nachher</p> <p>n Aktive Drehzahl</p> <p>n' Drehzahländerung</p>	<p>W</p> <p>W</p> <p>W</p> <p>W</p> <p>1/min</p> <p>1/min</p>
<p>Übersetzung</p>	$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1}$	<p>i Übersetzung</p> <p>n_1 Treibendes Rad</p> <p>n_2 Getriebenes Rad</p> <p>d_1 Durchmesser treibendes Rad</p> <p>d_2 Durchmesser grtriebenes Rad</p>	<p>1</p> <p>1/min</p> <p>1/min</p> <p>mm</p> <p>mm</p>

<p>Reihenschaltung</p>	<p>Parallelschaltung</p>	<p style="text-align: center;">Sinn ist: \dot{V} soll erhöht werden</p> <p>Reihenschaltung: Stutzenarbeit Y addieren</p> <p>Parallelschaltung: Volumenstrom \dot{V} addieren</p>
-------------------------------	---------------------------------	---

Thermische Maschinen

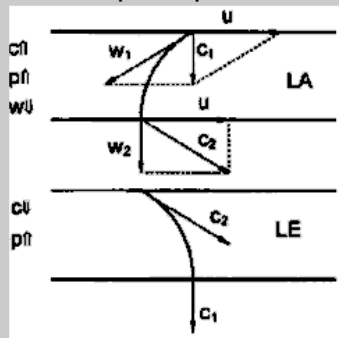
Spez. Stutzenarbeit Bei Gasen $g \cdot \Delta z \approx 0$ 1 J = 1 Nm	$Y = \left(u_d + \frac{p_d}{\rho} \right) - \left(u_s + \frac{p_s}{\rho} \right) + \frac{c_d^2 - c_s^2}{2} - q + g \cdot \Delta z_{d,s}$ $Y = \left(h_d + \frac{c_d^2}{2} \right) - \left(h_s + \frac{c_s^2}{2} \right) - q$ $Y = w_t + \frac{c_d^2 - c_s^2}{2}$	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 Hohendifferenz zw Saug+Drst. Innere Energie Druckstutzen Innere Energie Saugstutzen Wärmezufuhr bzw. -abfuhr Enthalpie Druckstutzen Enthalpie Saugstutzen Technische Arbeit	J/kg N/m ² N/m ² m/s m/s kg/m ³ 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:	<u>Isentrop $q=0$:</u> Kompression: $w_t = \frac{h_d - h_s}{\eta_i} = \frac{w_{ts}}{\eta_i}$ Expansion: $w_t = w_{ts} \cdot \eta_i$ <u>isotherm $T=const.$ ($h_d = h_s = const$)</u> $w_t = R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{p_d}{p_s} \right)$	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/m ² N/m ²
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
Enthalpie-Zuwachs (Pumpe) → -nahme (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
Enthalpie 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 	$r = \frac{\Delta h_{LA}}{w_t}$ <p> $r > 0,5$ Hochdruckräder (Radialkreiselpumpe, Kompressor) </p> <p> $r = 0,5$ Turbinenräder ($u_2 = c_{2u}$) </p> <p> $r < 0,5$ Niederdruckräder (Ventilator) </p>	r Δh_{LA} w_t	Reaktionsgrad Enthalpie Laufrad Technische Arbeit	1 J/kg J/kg

Energieumsetzung am Laufrad

Leistung am Laufrad	$P = F \cdot u$	P F u	Leistung am Laufrad Impulskraft an der Schaufel Umfangsgeschw. Laufrad	W N m/s
Impulskraft an der Schaufel Pelton-Turbine 	$F = \dot{m} \cdot (c - u) \cdot (1 - \cos \alpha)$	F \dot{m} c u α	Impulskraft an der Schaufel Massenstrom Absolutgeschw. Massenstrom Umfangsgeschw. Laufrad Neigungswinkel Auftrefffläche	N kg/s m/s m/s °
Umfangsgeschw.	$u = r \cdot \omega = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n$	u r n ω	Umfangsgeschw. Laufrad Radius an dem die Kraft angr. Drehzahl Laufrad Winkelgeschw. Laufrad	m/s m 1/s 1/s
Drehmoment am Laufrad infolge Strömung (Pumpe)	$M = \dot{m} \cdot (c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1)$	M \dot{m} c_{2u} u_2 c_{1u} u_1	Drehmoment am LA Massenstrom Umfangskomponente Austritt Umfangsgeschw. Austritt Umfangskomponente Eintritt Umfangsgeschw. Eintritt	Nm kg/s m/s m/s m/s m/s
theoretisch aufgenommene Leistung vom Laufrad	$P_{thec} = M \cdot \omega$ $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$	P_{thec} M ω n	theo. aufgen. Leistung am LA Drehmoment am LA Winkelgeschw. am LA Drehzahl LA	W Nm 1/s 1/s
Eulerische Pumpengleichung 	<p><u>Reibungsfrei mit ∞-vielen Schaufeln:</u></p> $Y_{thec} = \frac{P_{thec}}{\dot{m}} = u_2 \cdot c_{2u} - u_1 \cdot c_{1u}$ <p>bei drallfreier Zuströmung:</p> $Y_{thec} = u_2 \cdot c_{2u}$ <p><u>Reibungsfrei mit endlich vielen Sch.</u></p> $Y_{th} = Y_{thec} \cdot \mu$ <p><u>Reib- und Stoßbehaftet:</u></p> $Y = Y_{thec} \cdot \eta_i \cdot \mu$	Y_{thec} P_{thec} m° c_{2u} u_2 c_{1u} u_1 Y_{th} μ Y η_i	<p>theo spez. Stutzenarbeit theo. aufgen. Leistung am LA Massenstrom Umfangskomponente Austritt Umfangsgeschw. Austritt Umfangskomponente Eintritt Umfangsgeschw. Eintritt</p> <p>theo. spez. Stutzenarbeit Minderleistungsfaktor 0,7...0,85 (endliche Schaufelzahl) spez. Stutzenarbeit innerer Wirkungsgr (Reibung + Stoßbehaftet)</p>	J/kg W kg/s m/s m/s m/s m/s J/kg 1 J/kg 1
Reaktionsgrad 	$r = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{c_{2u}}{u_2} = \frac{Y_{stat thec}}{Y_{thec}} = 1 - \frac{Y_{kin thec}}{Y_{thec}}$ <p>$r > 0,5$ Hochdruckräder (Radialkreiselpumpe, Kompressor)</p> <p>$r = 0,5$ Turbinenräder ($u_2 = c_{2u}$)</p> <p>$r < 0,5$ Niederdruckräder (Ventilator)</p>	r Y_{thec} $Y_{stat thec}$ $Y_{kin thec}$ c_{2u} u_2 c_{1u} u_1	Reaktionsgrad theo. spez. Stutzenarbeit statischer Anteil kinetischer Anteil Umfangskomponente Austritt Umfangsgeschw. Austritt Umfangskomponente Eintritt Umfangsgeschw. Eintritt	1 J/kg J/kg J/kg m/s m/s m/s m/s
Kinetische Energie Absolute Beschleunigung	$Y_{kin thec} = \frac{W_{kin}}{m} = \frac{1}{2} \cdot (c_2^2 - c_1^2)$			
Druckenergie Relative Verzögerung	$Y_{p thec} = \frac{W_p}{m} = \frac{1}{2} \cdot (w_1^2 - w_2^2)$			
Druckenergie aus Fliehkraft	$Y_{F thec} = \frac{1}{2} \cdot (u_2^2 - u_1^2)$			
Theo. spez. Stutzenarbeit bei drallfreier Zuströmung	$Y_{thec} = \underbrace{Y_{F thec} + Y_{p thec}}_{Y_{stat thec}} + Y_{kin thec}$ $Y_{thec} = u_2 \cdot c_{2u}$			

Axiales Prinzip

Überdruckprinzip Verdichter



$$c_1 = w_2 \Rightarrow r = 0.5$$

zugeführte Arbeit (+)

$$Y_{\text{stat. theo}} = \Delta h_{\text{LA}} = \frac{1}{2} \cdot (w_1^2 - w_2^2)$$

$$Y_{\text{kin. theo}} = \Delta h_{\text{LE}} = \frac{1}{2} \cdot (c_2^2 - c_1^2)$$

$$r = \frac{Y_{\text{stat. theo}}}{Y_{\text{theo}}} = \frac{Y_{\text{stat. theo}}}{Y_{\text{kin. theo}} + Y_{\text{stat. theo}}}$$

$$r = \frac{\Delta h_{\text{LA}}}{\Delta h_{\text{LA}} + \Delta h_{\text{LE}}}$$

Δh_{LA}

Δh_{LE}

r

c_1

c_2

w_1

w_2

u

Y_{theo}

$Y_{\text{st. theo}}$

$Y_{\text{ki. theo}}$

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

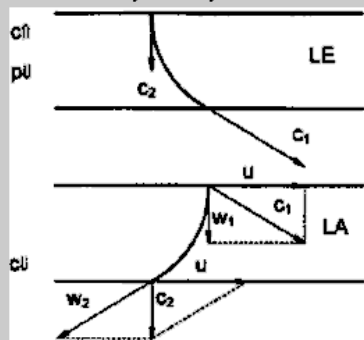
m/s

J/kg

J/kg

J/kg

Überdruckprinzip Turbine



$$c_2 = w_1 \Rightarrow r = 0.5$$

abgeführte Arbeit (-)

$$Y_{\text{stat. theo}} = \Delta h_{\text{LA}} = \frac{1}{2} \cdot (w_1^2 - w_2^2)$$

$$Y_{\text{kin. theo}} = \Delta h_{\text{LE}} = \frac{1}{2} \cdot (c_2^2 - c_1^2)$$

$$r = \frac{Y_{\text{stat. theo}}}{Y_{\text{theo}}} = \frac{Y_{\text{stat. theo}}}{Y_{\text{kin. theo}} + Y_{\text{stat. theo}}}$$

$$r = \frac{\Delta h_{\text{LA}}}{\Delta h_{\text{LA}} + \Delta h_{\text{LE}}}$$

Δh_{LA}

Δh_{LE}

r

c_1

c_2

w_1

w_2

u

Y_{theo}

$Y_{\text{st. theo}}$

$Y_{\text{ki. theo}}$

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

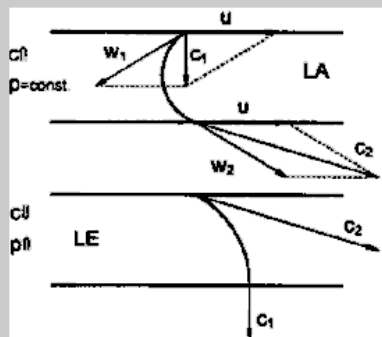
m/s

J/kg

J/kg

J/kg

Gleichdruckprinzip Verdichter



$$w_1 = w_2 \Rightarrow r = 0$$

zugeführte Arbeit (+)

$$Y_{\text{stat. theo}} = \Delta h_{\text{LA}} = \frac{1}{2} \cdot (w_1^2 - w_2^2) = 0$$

$$Y_{\text{kin. theo}} = \Delta h_{\text{LE}} = \frac{1}{2} \cdot (c_2^2 - c_1^2) = w_1$$

$$r = \frac{Y_{\text{stat. theo}}}{Y_{\text{theo}}} = \frac{Y_{\text{stat. theo}}}{Y_{\text{kin. theo}} + Y_{\text{stat. theo}}} = 0$$

$$r = \frac{\Delta h_{\text{LA}}}{\Delta h_{\text{LA}} + \Delta h_{\text{LE}}} = 0$$

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_{theo}

$Y_{\text{st. theo}}$

$Y_{\text{ki. theo}}$

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

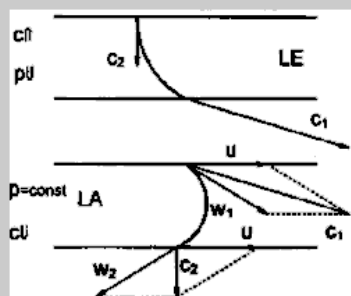
m/s

J/kg

J/kg

J/kg

Gleichdruckprinzip Turbine



$$w_1 = w_2 \Rightarrow r = 0$$

abgeführte Arbeit (-)

$$Y_{\text{stat. theo}} = \Delta h_{\text{LA}} = \frac{1}{2} \cdot (w_1^2 - w_2^2) = 0$$

$$Y_{\text{kin. theo}} = \Delta h_{\text{LE}} = \frac{1}{2} \cdot (c_2^2 - c_1^2) = w_1$$

$$r = \frac{Y_{\text{stat. theo}}}{Y_{\text{theo}}} = \frac{Y_{\text{stat. theo}}}{Y_{\text{kin. theo}} + Y_{\text{stat. theo}}} = 0$$

$$r = \frac{\Delta h_{\text{LA}}}{\Delta h_{\text{LA}} + \Delta h_{\text{LE}}} = 0$$

Δh_{LA}

Δh_{LE}

r

c_1

c_2

w_1

w_2

u

Y_{theo}

$Y_{\text{st. theo}}$

$Y_{\text{ki. theo}}$

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

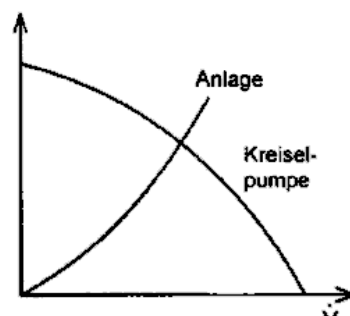
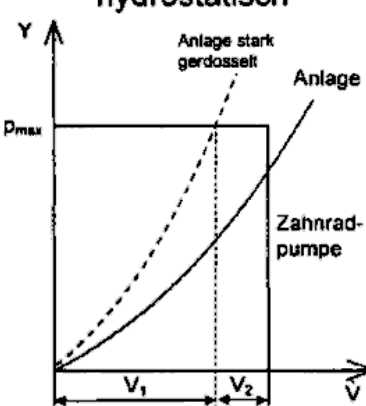
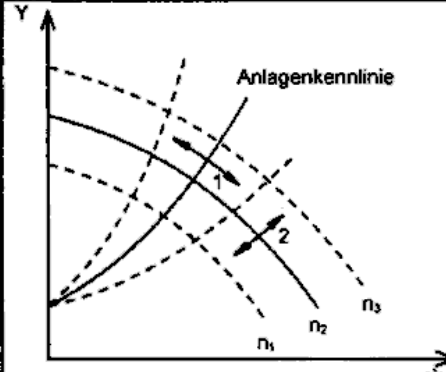
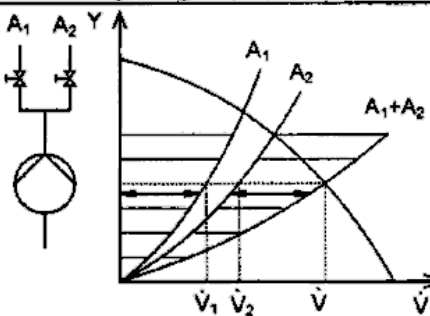
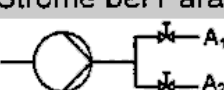
Turbine: abgeführte Arbeit (-)

Verdichter: zugeführte Arbeit (+)

$$w_t = Y_{\text{theo}} = Y_{\text{kin. theo}} + Y_{\text{stat. theo}}$$

$$w_t = \Delta h_{\text{LA}} + \Delta h_{\text{LE}}$$

Kennlinien

<p>Drosselkennlinie Strömungsarbeitsmaschine (Kreiselpumpe)</p>	<p style="text-align: center;">hydrodynamisch</p> 	
<p>Drosselkennlinie Verdrängermaschine (Zahnradpumpe)</p> <p>bei Drehzahlerhöhung $n \sim \dot{V}$</p> <p>$\Rightarrow \dot{V}' = k \cdot \dot{V}$</p> <p>$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2$</p>	<p style="text-align: center;">hydrostatisch</p> 	<p>V° $V^{\circ'}$ n k</p> <p>Volumenstrom erhöhter Volumenstrom Drehzahl Faktor</p>
<p>Betriebspunkt ändern Sinn V° zu ändern!</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Verändern der Anlage durch Drosselung 2. Verändern der Maschine - andere Drehzahl - anderes Laufrad (Schaufelverstellung) 	 <p>Drehzahländerung stets günstiger als Drosselregelung weil $P \ll P'$</p>	
<p>Aggen parallel</p> <p>Addieren der Volumenströme bei gleichem Y oder Δp_i</p>	 <p>$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2$</p>	
<p>Teilungsverhältnis der Ströme bei Paralleler Anlage</p> 	$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}$	
<p>Konstante bei kreisförmigen Röhren</p>	$K_i = \frac{8 \cdot \rho}{\pi^2 \cdot d^4} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \zeta_i + \lambda \cdot \frac{\ell}{d} \right)$	
<p>Totaldruckerhöhung spez. Stuzenarbeit</p>	$\Delta p_i = K_i \cdot \dot{V}_i^2 \quad ; \quad Y = \frac{K_i}{\rho} \cdot \dot{V}_i^2$	

Kavitation (NPSH = Nettoenergiehöhe im Eintrittsquerschnitt einer Pumpe)

<p>NPSH-Wert der Anlage Vorhandener Sicherheitsabstand zwischen Dampfdruck und Energie</p> <p>1 kg/dm³ = 1000 kg/m³ 1 bar = 10⁵ Pa</p>	$NPSH_A = \frac{p_1 - p_D}{\rho \cdot g} - \frac{c_1^2}{2 \cdot g} - z_S - \frac{\Delta p_{VS}}{\rho \cdot g}$ <p>Häufig: $p_1 = p_0$ und $c_1 = 0$</p> $NPSH_A = NPSH_{\text{vorf}}$	<p>p_1 p_D p_0 c_1 Δp_{VS} ρ z_S g $NPSH_A$</p>	<p>Druck an der Stelle 1 Dampfdruck Tabelle 1 Atmosphärendruck Geschw. an Stelle 1 Druckverlust durch Reibung Dichte der Flüssigkeit Tb. 1 Höhenunterschied Erdbeschleunigung NPSH-Wert der Anlage</p>	<p>Pa Pa Pa m/s Pa kg/m³ m m/s² m</p>
<p>Grafische Darstellung</p> <p>Der NPSH_{erf}-Wert muß mit steigendem Volumenstrom wachsen, daß genügend Sicherheitsabstand zwischen NPSH_A und NPSH_{erf} ist, da der Volumenstrom bei NPSH_A quadratisch eingeht. $K_2 \cdot V^2$</p>	$NPSH_A = \frac{p_0 - p_D}{\rho \cdot g} - z_S - \frac{\Delta p_{VS}}{\rho \cdot g}$ $NPSH_A = K_1 - K_2 \cdot V^2$	<p>p_0 p_D Δp_{VS} ρ z_S g K_1 K_2 \dot{V} $NPSH_A$</p>	<p>Dampfdruck Tabelle 1 Atmosphärendruck Druckverlust durch Reibung Dichte der Flüssigkeit Tb. 1 Höhenunterschied Erdbeschleunigung Konstante fest durch Reib.+Wid. Konstante abh. von Volumenst. Volumenstrom NPSH-Wert der Anlage</p>	<p>Pa Pa Pa kg/m³ m m/s² m m m³/s m</p>
<p>Zugelassene Kavitation</p>	<p>Prüfen: $NPSH_A > NPSH_{\text{erf}}$</p>	<p>$NPSH_A$ $NPSH_{\text{erf}}$</p>	<p>NPSH-Wert der Anlage Pumpenspez. Herstellerangabe</p>	<p>m m</p>
<p>Für Grenzwertberechnung</p>	<p>$NPSH_A = NPSH_{\text{erf}}$</p>	<p>$NPSH_A$ $NPSH_{\text{erf}}$</p>	<p>NPSH-Wert der Anlage Pumpenspez. Herstellerangabe</p>	<p>m m</p>
	$p_D + \rho \cdot g \cdot NPSH_{\text{erf}} = p_{S_{\text{zul}}} + \frac{\rho}{2} \cdot c_S^2$ $p_1 + \frac{\rho}{2} \cdot c_1^2 = p_{S_{\text{zul}}} + \frac{\rho}{2} \cdot c_S^2 + \rho \cdot g \cdot z_S + \Delta p_{VS}$	<p>p_D $p_{S_{\text{zul}}}$ c_S $p_{\text{totS}_{\text{zul}}}$ ρ g $NPSH_{\text{erf}}$ c_1 z_S p_1 Δp_{VS}</p>	<p>Dampfdruck Tabelle 1 Zul. Saugdruck an der Stelle S Sauggeschw. am Stutzen Zul. Totaldruck am Stutzen Dichte der Flüssigkeit Tb. 1 Erdbeschleunigung Pumpenspez. Herstellerangabe Geschw. an stelle 1 (meist 0) Höhe bis Saugstutzen Abs. Druck Stelle 1 Druckverlust durch Reibung</p>	<p>Pa Pa m/s Pa kg/m³ m/s² m m/s m Pa Pa</p>
<p>Zulässiger Saugdruck am Saugstutzen</p>	$p_{S_{\text{zul}}} = p_D + \rho \cdot g \cdot NPSH_{\text{erf}} - \frac{\rho}{2} \cdot c_S^2$			
<p>Zulässige Reibung durch Druckverlust</p>	$\Delta p_{VS_{\text{zul}}} = p_1 - p_D - \rho \cdot g \cdot NPSH_{\text{erf}} + \frac{\rho}{2} \cdot c_1^2 - \rho \cdot g \cdot z_S$			
<p>Zulässige Höhe</p>	$z_{S_{\text{zul}}} = \frac{p_1 - p_D}{\rho \cdot g} - NPSH_{\text{erf}} + \frac{c_1^2}{2 \cdot g} - \frac{\Delta p_{VS}}{\rho \cdot g}$			
<p>Erf. Vordruck zum kavitationsfreien betrieb der Pumpe</p>	$p_{1_{\text{erf}}} = p_D + \rho \cdot g \cdot NPSH_{\text{erf}} - \frac{\rho}{2} \cdot c_1^2 + \rho \cdot g \cdot z_S + \Delta p_{VS}$			
<p>Erf. Überdruck</p>	$p_{1_{\text{erf}}} = p_{1_{\text{erf}}} - p_D$	<p>$p_{1_{\text{erf}}}$ $p_{1_{\text{erf}}}$ p_D</p>	<p>Erf. Überdruck an Stelle 1 Erf. Absolutdruck an Stelle 1 Atmosphärendruck</p>	<p>bar bar bar</p>

