

Grundlagen der Strömungsmaschinen und Windturbinen

5. Bestimmung der Hauptabmessungen, Entwurfsschritte

Lehrstuhl Strömungsmaschinen

Gliederung der Vorlesung

1. Einführung, Einteilung, Historische Entwicklung, Aufbau und Wirkungsweise
2. Strömungsmechanische Grundlagen
3. Energieübertragung am Rotor, Ableitung der Euler'schen Turbomaschinengleichung
4. Ähnlichkeitsmechanik
- 5. Bestimmung der Hauptabmessungen, Entwurfsschritte, Verluste**
6. Strömungsmaschine im System, Kennlinien, Regelung
7. Kavitation
8. Strömungsmaschinen (Pumpe, Verdichter, Flugzeugtriebwerk)
9. Dampfturbinen
10. Windturbinen
11. Sonderbauarten (Strömungswandler, Seitenkanalmaschinen, Voith-Schneider-Propeller, Gezeitenturbinen)
12. Zusammenfassung

5.1 Wiederholung



theoretische spezifische Förderarbeit:

$$Y_{th\infty} = (u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u})$$

Berücksichtigung der Minderumlenkung und der Fluidreibung

spezifische Förderarbeit (Stutzenarbeit):

Arbeitsmaschine:

$$Y = \mu \cdot \eta_h \cdot Y_{th\infty} = \mu \cdot \eta_h \cdot (u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u})$$

Kraftmaschine:

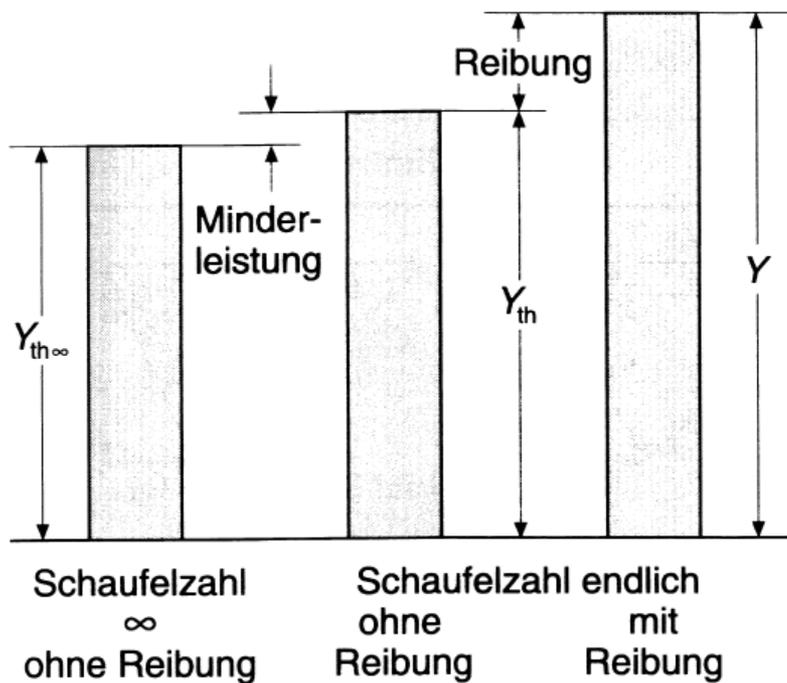
$$Y = \frac{Y_{th\infty}}{\mu \cdot \eta_h} = \frac{1}{\mu \cdot \eta_h} \cdot (u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u})$$

mit: μ ... Minderleistungsfaktor
 η_h ...hydraulischer Wirkungsgrad

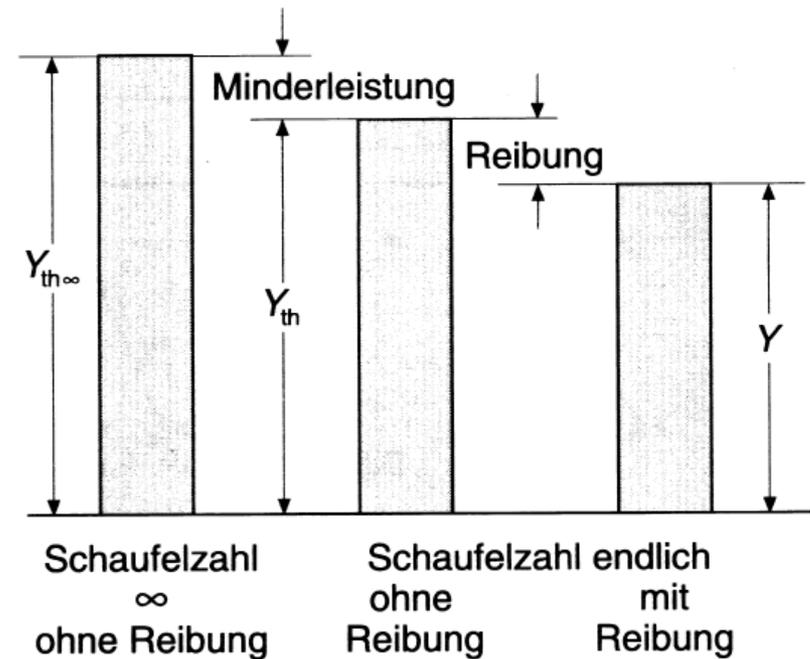
Euler'sche Turbomaschinengleichung

ideale \leftrightarrow reale Strömung durch eine Strömungsmaschine

Kraftmaschine



Arbeitsmaschine



[Bohl: Strömungsmaschinen 1]

Kennzahlen

Lieferzahl

(Durchflusszahl)

$$\varphi = \frac{c_D}{u} \quad \varphi = \frac{c_{2m}}{u}$$

Druckzahl

$$\psi = \frac{\Delta p}{\rho \frac{u_2^2}{2}} = \frac{2 \cdot Y}{u_2^2}$$

Schnellaufzahl

$$\sigma = n \cdot \frac{\sqrt{\dot{V}}}{(2 \cdot Y)^{3/4}} \cdot 2 \cdot \sqrt{\pi} \quad \sigma = \frac{\varphi^{1/2}}{\psi^{3/4}}$$

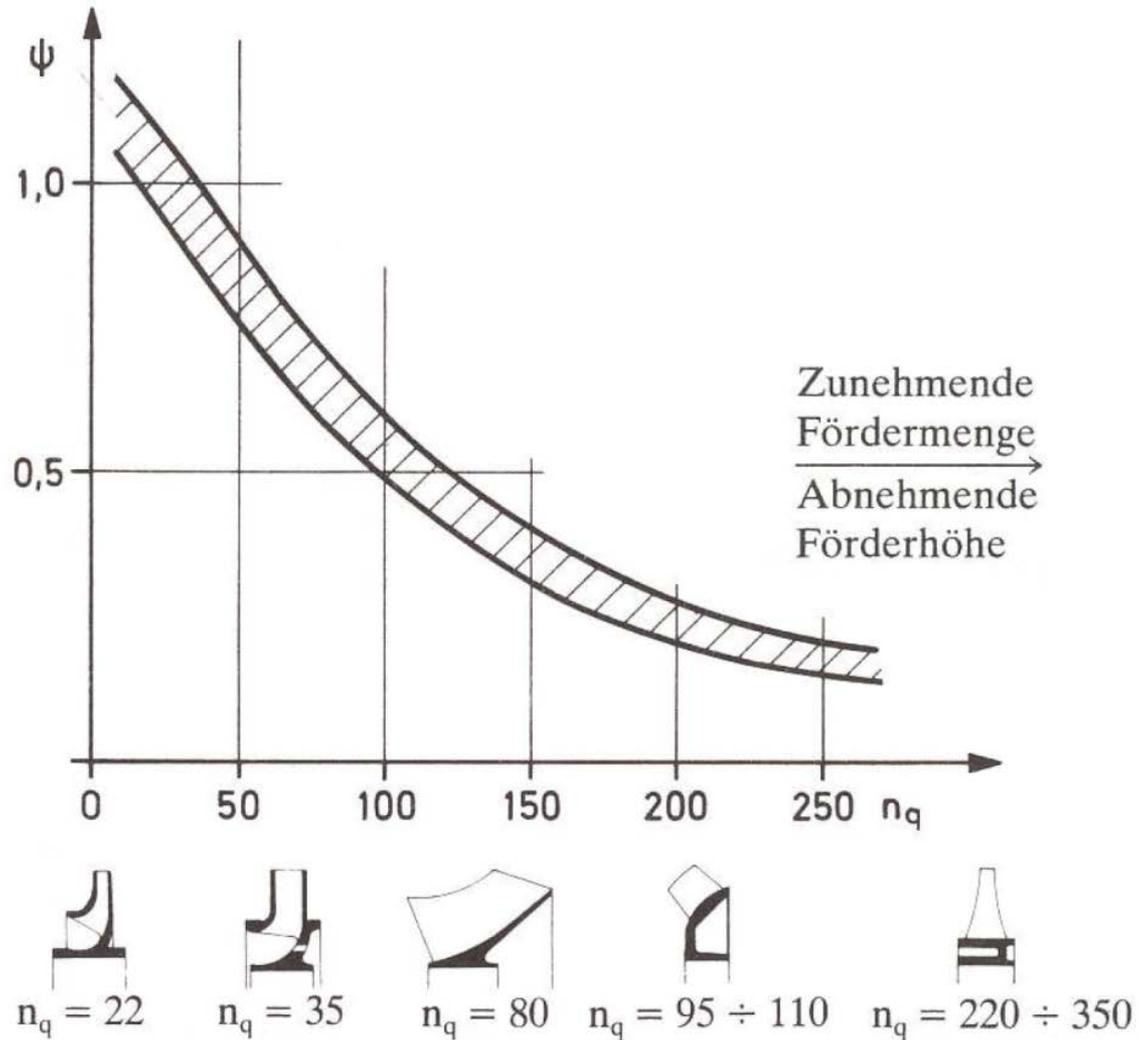
Durchmesserzahl

$$\delta = D \cdot \frac{(2 \cdot Y)^{1/4}}{\sqrt{\dot{V}}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad \delta = \frac{\psi^{1/4}}{\varphi^{1/2}}$$

spezifische Drehzahl

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{\dot{V}}}{H^{3/4}} \quad (\text{Radformkennzahl})$$

spezifische Drehzahl



Druckzahl in Abhängigkeit von der spezifischen Drehzahl

5.2 Entwurfsschritte

Entwicklungsphasen am Beispiel eines hydraulischen Pumpenbauteils

Entwicklungsphasen	Angewendete Methoden
Entwurf der hydr. Teile	Pfleiderer, Stepanoff, Gülich
Konstruktion	2D/3D-CAD
Optimierung strömungstechnisch mechanisch technologisch	Numerische Verfahren (CFD, FEM) Versuche
Prototypenbau und -test	Gußmodelle Rapid-Prototyping (3D-Drucken) Mehrachsenfräsen
Serieneinführung	

Entwurfsschritte

Vorgaben, Eingangsgrößen:

- Volumenstrom
- Enthalpieänderung bzw. Druckänderung
- bei Pumpen und Wasserturbinen: $NPSH_A$

1. Bestimmung Maschinentyp und Hauptabmessungen
2. Entwurf des Meridianschnittes
3. Berechnung des Meridiangeschwindigkeitsfeldes und Festlegen der Lage von Ein- und Austrittskante
4. Bestimmung der Strömungswinkel $\alpha_0, \beta_0, \alpha_3, \beta_3$ auf mehreren Stromlinien
5. Bestimmung der Schaufelwinkel β_1, β_2 auf mehreren Stromlinien
6. Berechnung der Geschwindigkeitskomponenten und Festlegen eines β - Verlaufes oder w -Verlaufes auf mehreren Stromlinien

Entwurfsschritte

7. Iterativ: Korrektur des Meridiangeschwindigkeitsfeldes, Geometrische Beschreibung des gesamten Entwurfs und ggf. Glättung bzw. Anpassung an gewünschtes Fertigungsverfahren
8. strömungstechnische (CFD) und strukturmechanische (FEM) Optimierung
9. Entwurf der Leiteinrichtung
10. Optimierung der Leiteinrichtung

5.3 Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen

Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen

- Grundaufgabe für Anwendung, Auslegung und Entwicklung von Strömungsmaschinen
- Anwendung der Ähnlichkeitskennzahlen
- Überprüfung der Optimumnähe z.B. mittels Cordier-Diagramm
- viele Maschinen einstufig → Auswahl und Dimensionierung einer Stufe

Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen

Einstufige Maschinen:

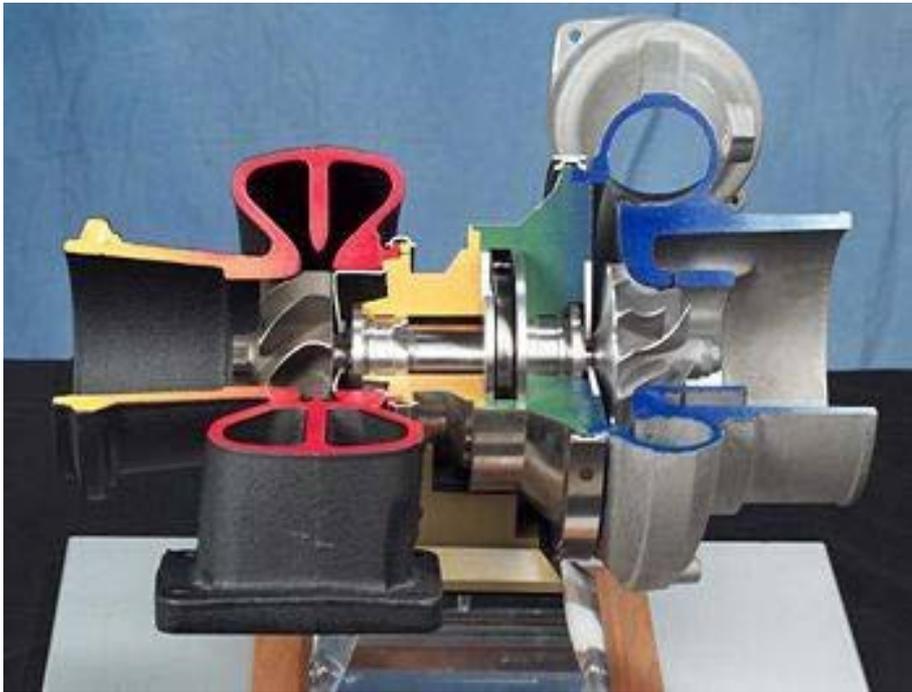
- Wasserturbinen
 - Ventilatoren
 - Kreiselpumpen
 - Verdichter und Gasturbine von Abgasturboladern
 - Pumpen und Turbinen in Strömungsgetrieben
 - Gezeitenturbinen
 - Propeller
 - Windturbinen
 - Rührer
- überwiegend einstufig ausgeführt

Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen



Einstufige Kreiselpumpe

Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen



Abgasturbolader



Rührer

Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen

Mehrstufige Maschinen:

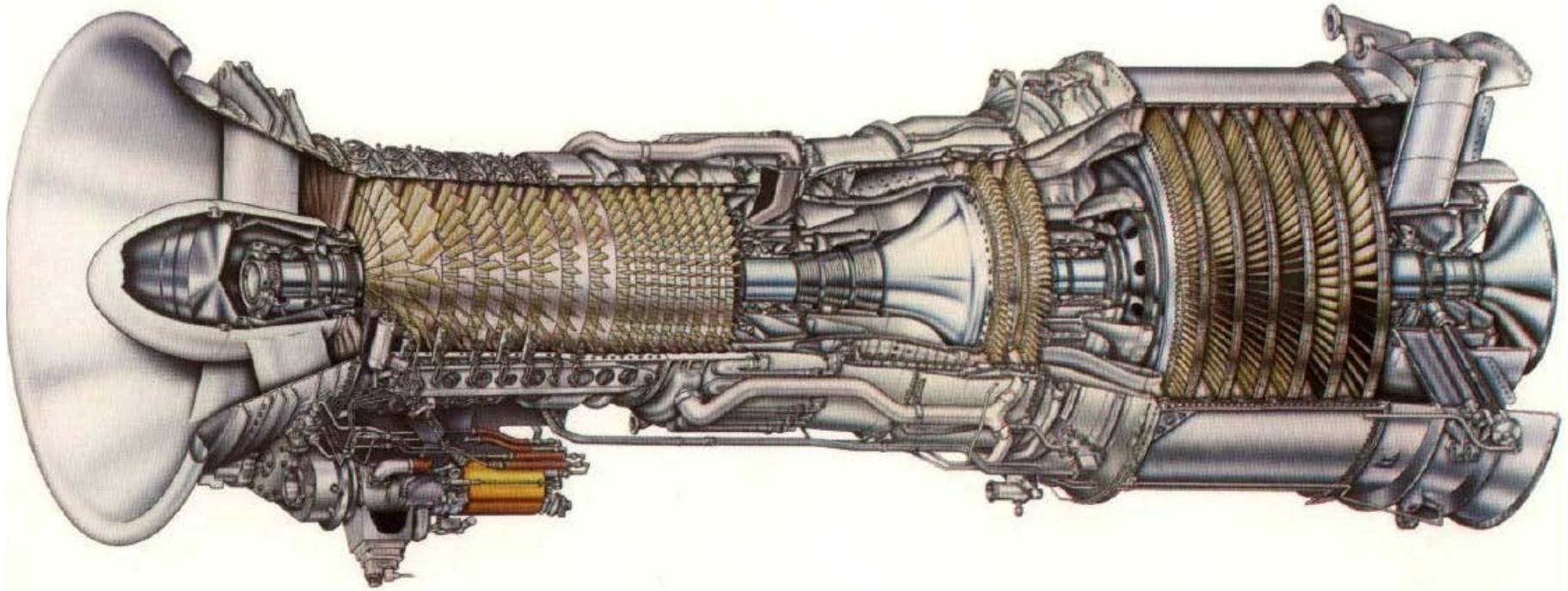
- Radial- und Axialverdichter
- Gasturbinen
- Dampfturbinen
- Hochdruckpumpen (z. B. Kesselspeisepumpe)

Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen



mehrstufige Dampfturbine

Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen



General Electric LM2500 Gas Turbine

Strahltriebwerk mit mehrstufigen Verdichter und Turbine

Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen

Gegebene Größen:

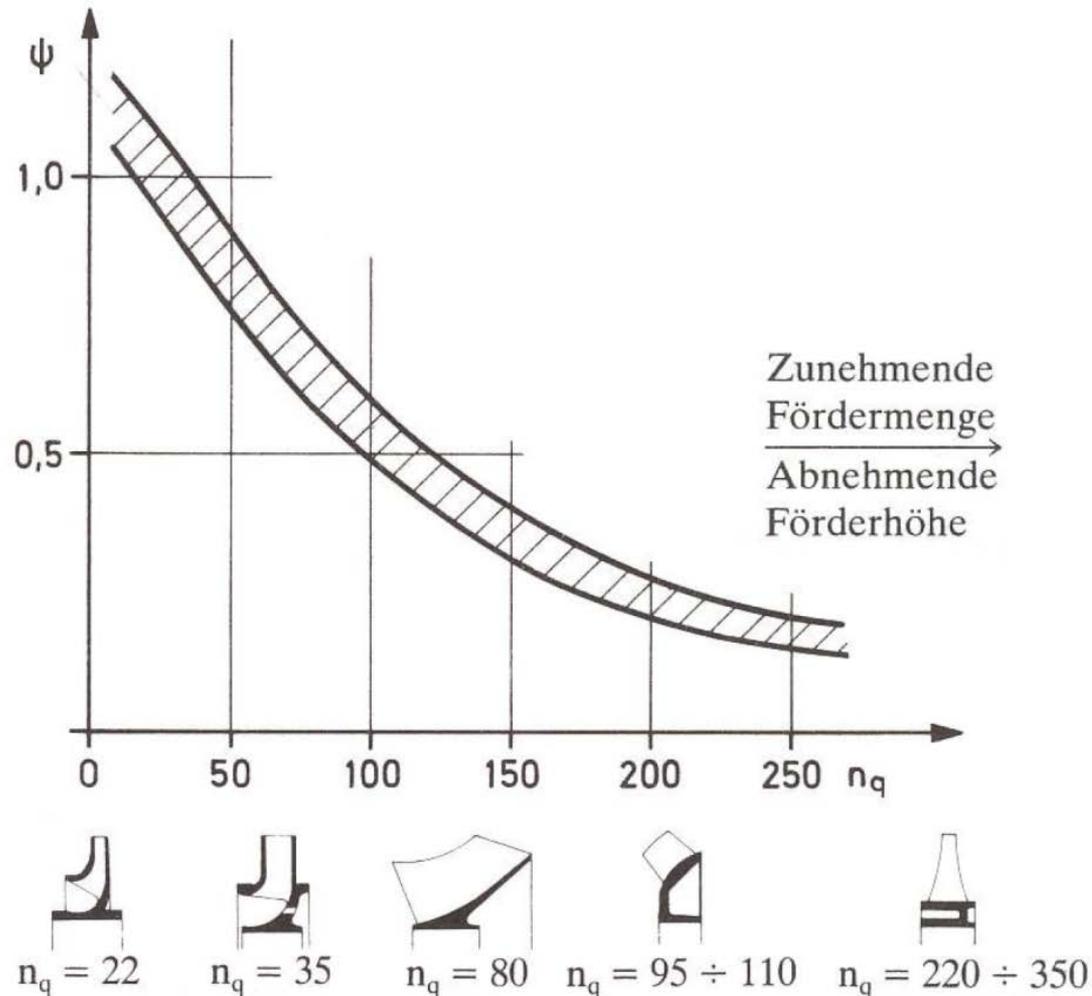
- Volumenstrom
- Enthalpiedifferenz bzw. Druckänderung
- $NPSH_A$ bei wasserführenden Strömungsmaschinen

Gesucht:

- Drehzahl und Durchmesser (bei einstufigen Maschinen)
- zusätzlich Stufenanzahl bei mehrstufigen Maschinen

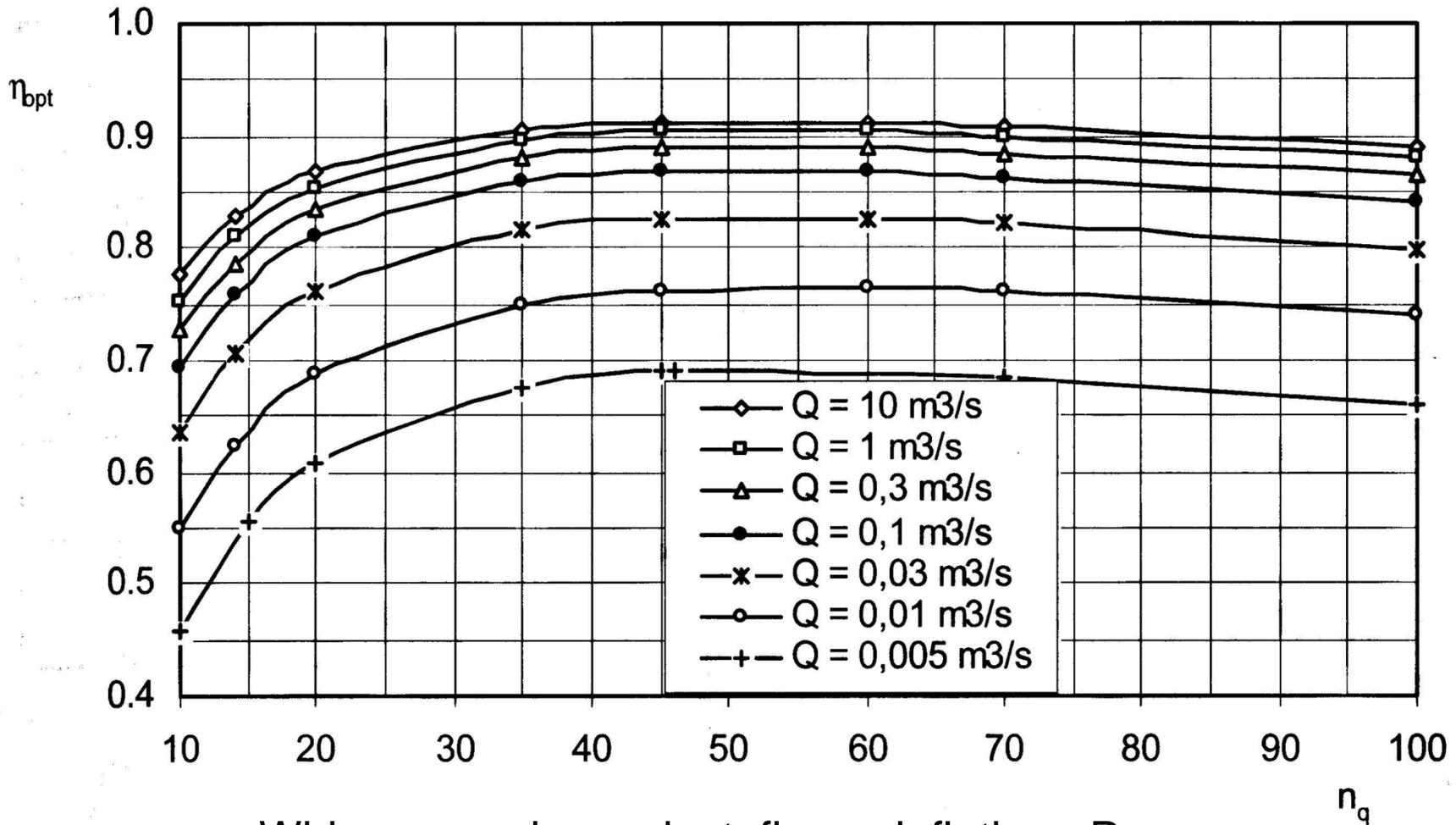
Wahl der Drehzahl → Festlegung von Laufradtyp und erreichbarem Wirkungsgrad

Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen



Laufradtyp in Abhängigkeit von der spezifischen Drehzahl

Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen



Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen

Entscheidende Rolle bei der Festlegung der Hauptabmessungen spielt in der Regel die **Umfangsgeschwindigkeit u**.

Die Umfangsgeschwindigkeit wird limitiert durch:

- Festigkeit
- Kavitation
- Relation zur Schallgeschwindigkeit (Machzahleinfluss)
- Verschleiß, Abrieb und Anbacken bei Fluid-Feststoffgemischen

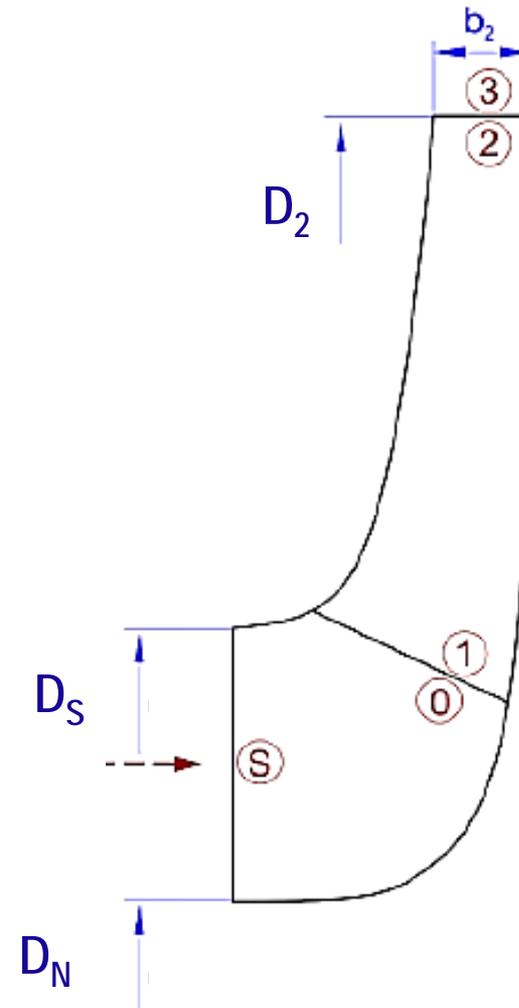
weitere Bedingungen:

- Vorgabe ausgewählter Drehzahlen z.B. durch elektrische Maschinen
- Baubegrenzungen z.B. bei Schiffspropellern

Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen

Hauptabmessungen:

- Nabendurchmesser
- Saugmündendurchmesser
- Austrittsbreite
- Laufraddurchmesser



Bestimmung von Laufradtyp und Hauptabmessungen

Verfahren zur Bestimmung der Hauptabmessungen:

- Nutzung des Cordier-Diagramms
- Nutzung von Diagrammen und Erfahrungswerten

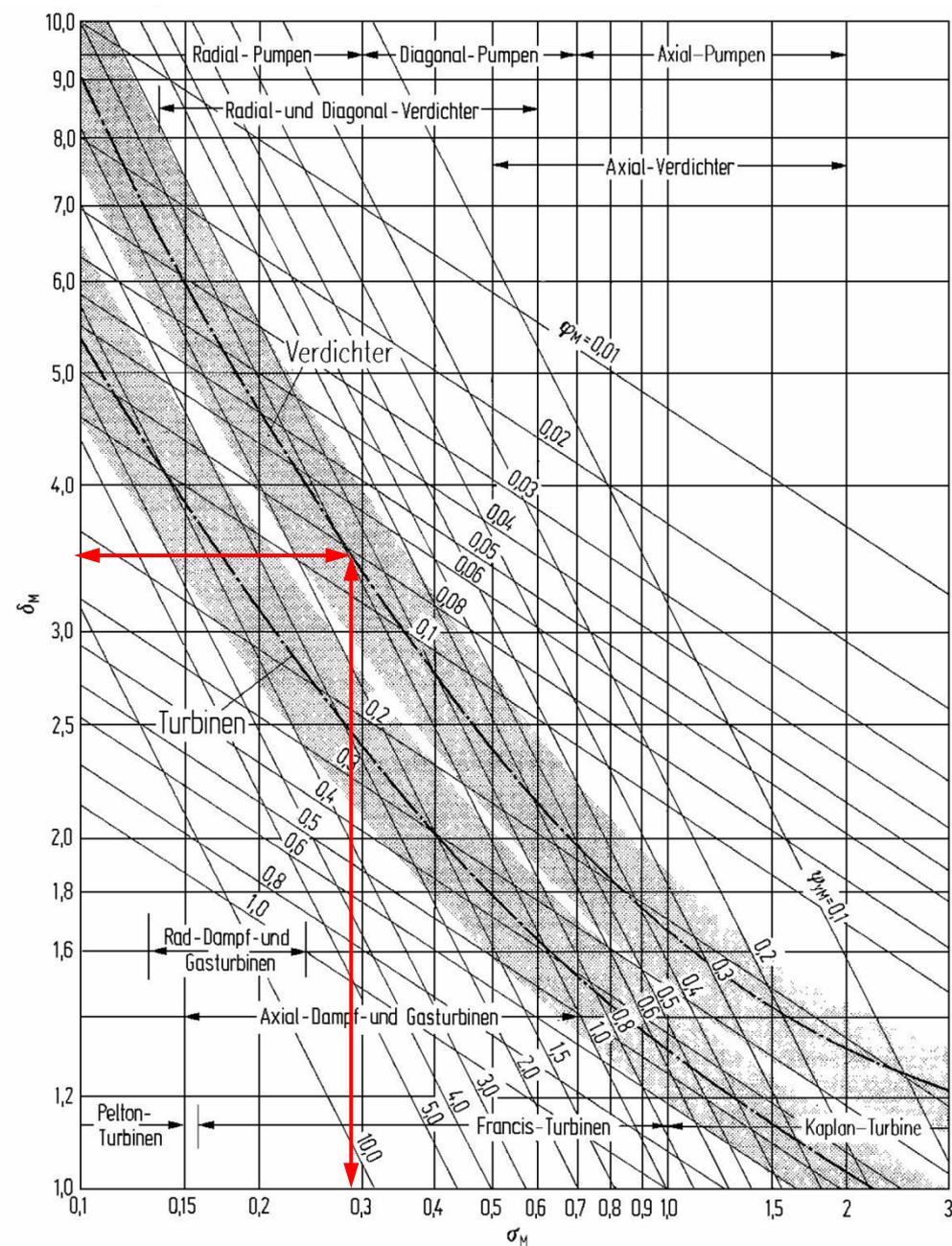
Hauptabmessungen

Ermittlung des Laufraddurchmessers mittels Cordier-Diagramm

1. Berechnung der Kennzahlen Durchmesserzahl oder Schnelllaufzahl aus den gegebenen Größen:

$$\dot{V}, Y, D_2, n$$

1. Ermittlung der fehlenden Größe über die Bestimmung der Kennzahlen Durchmesserzahl oder Schnelllaufzahl mittels Cordier-Diagramm
2. Ermittlung der Umfangsgeschwindigkeit am Laufraddurchmesser D



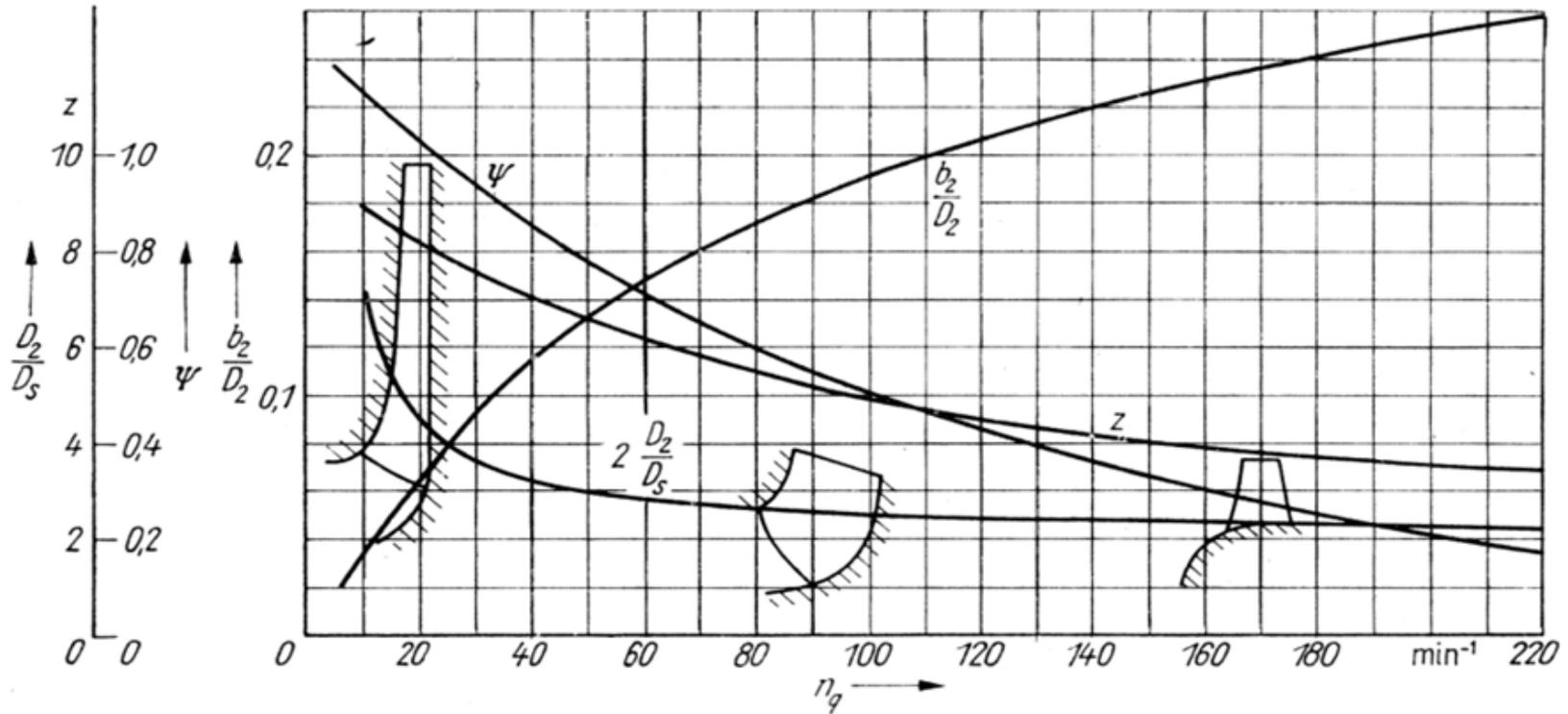
Cordierdiagramm

Hauptabmessungen

Bestimmung der Hauptabmessungen aus Diagrammen und Erfahrungswerten

- n_q
- $\psi = f(n_q)$
- $\frac{b_2}{D_2} = f(n_q)$
- $\frac{D_2}{D_S} = f(n_q)$
- $z = f(n_q)$

Kreiselradpumpen



entnommen aus Prager, R.: Technisches Handbuch Pumpen

Hauptabmessungen über der spezifischen Drehzahl aufgetragen

5.4 Wirkungsgrad, Verluste in Strömungsmaschinen

Wirkungsgrad, Verluste

Gesamtwirkungsgrad

Kraftmaschinen:

$$\eta = \frac{\textit{verfügbare Wellenleistung}}{\textit{Leistung der verlustlosen Maschine}}$$

Arbeitsmaschinen:

$$\eta = \frac{\textit{Förderleistung}}{\textit{Leistungsaufnahme an der Welle}}$$

Wirkungsgrad, Verluste

Verluste

innere Verluste

= Strömungsverluste

- Profil-, Schaufelverluste
- Radseitenreibungsverluste
- Ventilationsverluste

Fluidreibung in Lauf- u. Leitrad und den Gehäusekanälen

zwischen rotierenden scheibenförmigen Laufrädern und stehenden Gehäusewänden

Verluste durch Teilbeaufschlagung des Laufrades (Pelton-Turbine, Gleichdruck-Dampfturbine)

Wirkungsgrad, Verluste

Verluste

volumetrische Verluste

= Leckmassenströme

- Spaltströmungen (innere Leckagen)
- äußere Leckagen

Leckmassenströme infolge Druckdifferenzen zwischen ruhenden und rotierenden Bauteilen

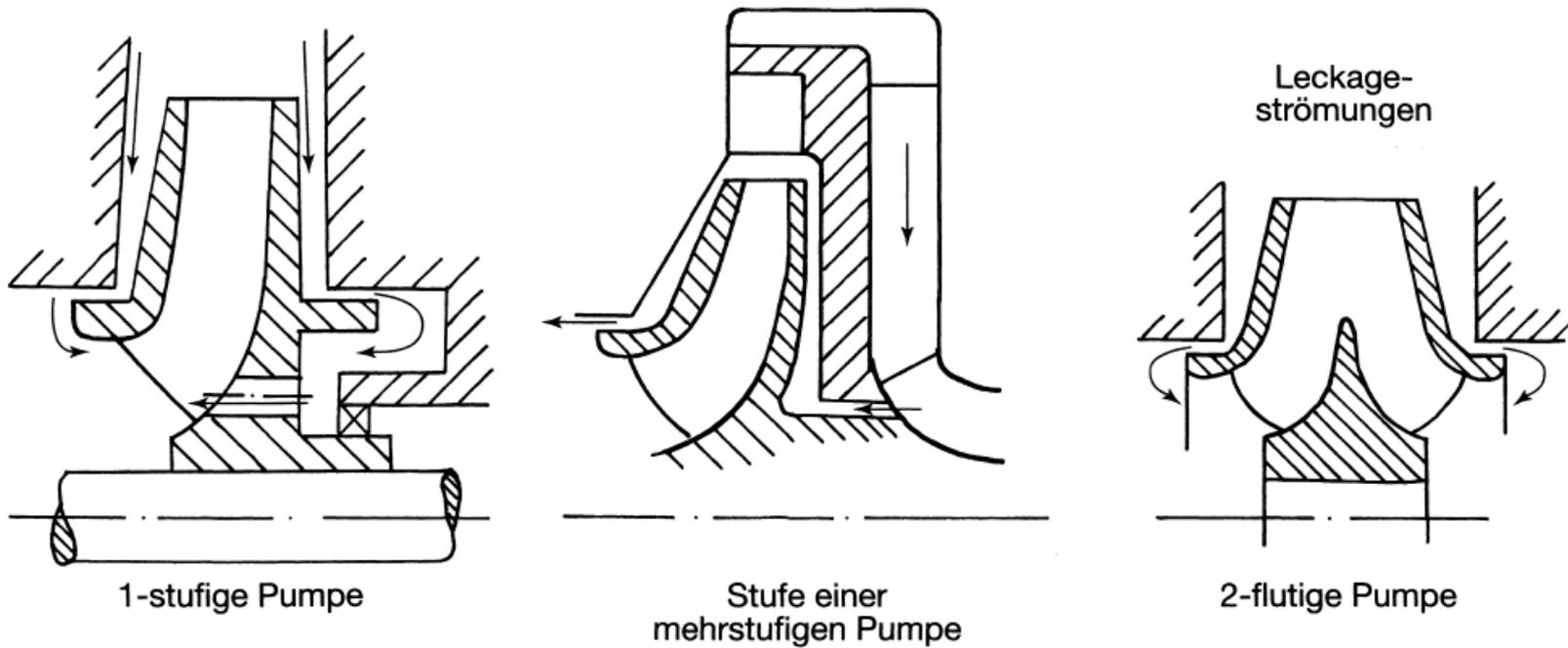
Leckstrom über Wellen- und Gehäuseabdichtungen

mechanische Verluste

Reibungsverluste in den Lagern und Wellendichtungen, Leistung für Hilfsantriebe

Wirkungsgrad, Verluste

Spaltverluste



Leckageströmungen in den Radseitenräumen von Radialpumpen [Bohl: Strömungsmaschinen 1]

Wirkungsgrad, Verluste

Gesamtwirkungsgrad

$$\eta = \eta_i \cdot \eta_v \cdot \eta_m$$

mit: η ... Gesamtwirkungsgrad
 η_i ... innerer Wirkungsgrad
 η_v ... volumetrischer Wirkungsgrad (auch η_l)
 η_m ... mechanischer Wirkungsgrad

Wirkungsgrad, Verluste

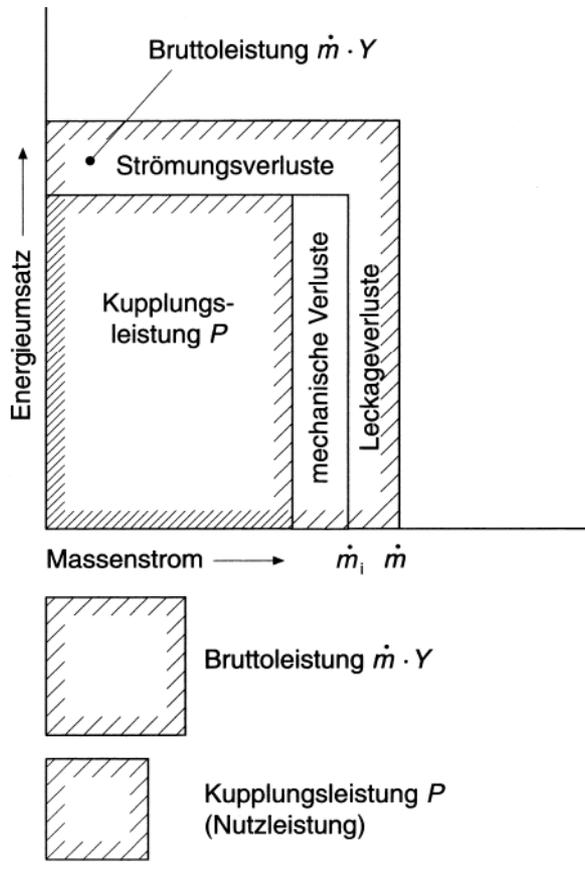
Unterteilung des inneren Wirkungsgrades in

$$\eta_i = \eta_h \cdot \eta_{RS} \cdot \eta_{Vent}$$

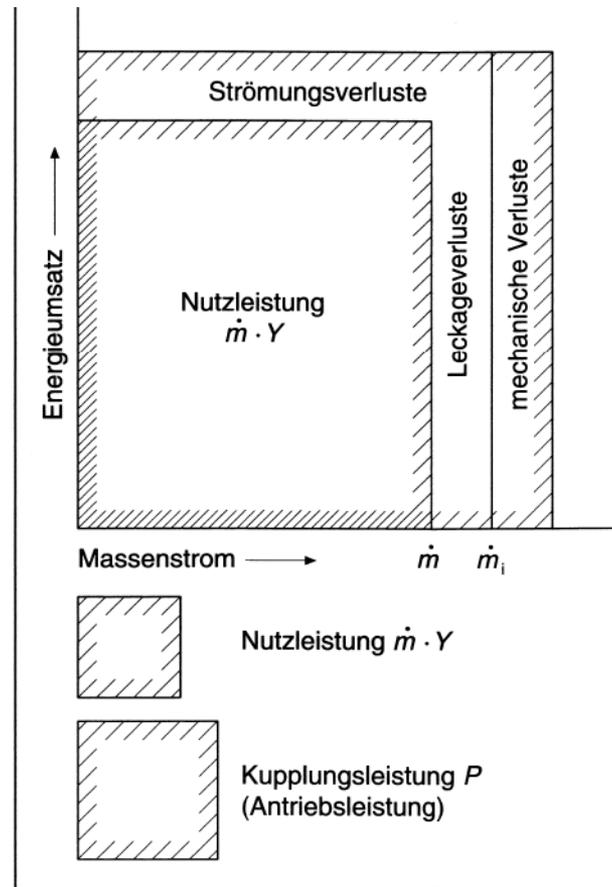
mit: η_h ... *hydraulischer Wirkungsgrad*
 η_{RS} ... *Radseitenreibungs – Wirkungsgrad*
 η_{Vent} ... *Wirkungsgrad zur Erfassung
der Ventilationsverluste*

Leistungsbilanz

Kraftmaschine



Arbeitsmaschine



Wirkungsgrad, Verluste

Einfluss des Laufradtyps auf den Wirkungsgrad einer Pumpe

kleine spezifische Drehzahl n_q :

- Rückströmungen steigen wegen hoher Druckdifferenz
- Radseitenreibung steigt wegen großer Reibungsfläche
- steigende Verluste in den Leitkanälen wegen hoher Absolutgeschwindigkeit
- kleines $n_q \rightarrow$ sorgfältige Auslegung des Leitapparates
- höheres $n_q \rightarrow$ sorgfältige Auslegung des Laufrades

