

# Grundlagen der Strömungsmaschinen und Windturbinen

## 7. Strömungsmaschine im System, Kennlinien, Regelung

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. Kavitation
7. **Strömungsmaschine im System, Kennlinien, Regelung**
8. Strömungsmaschinen (Pumpe, Verdichter, Flugzeugtriebwerk)
9. Dampfturbinen
10. Windturbinen
11. Sonderbauarten (Strömungswandler, Seitenkanalmaschinen, Voith-Schneider-Propeller, Gezeitenturbinen)
12. Zusammenfassung

## 7.1 Strömungsmaschine im System

# Strömungsmaschine im System

## Begriffe:

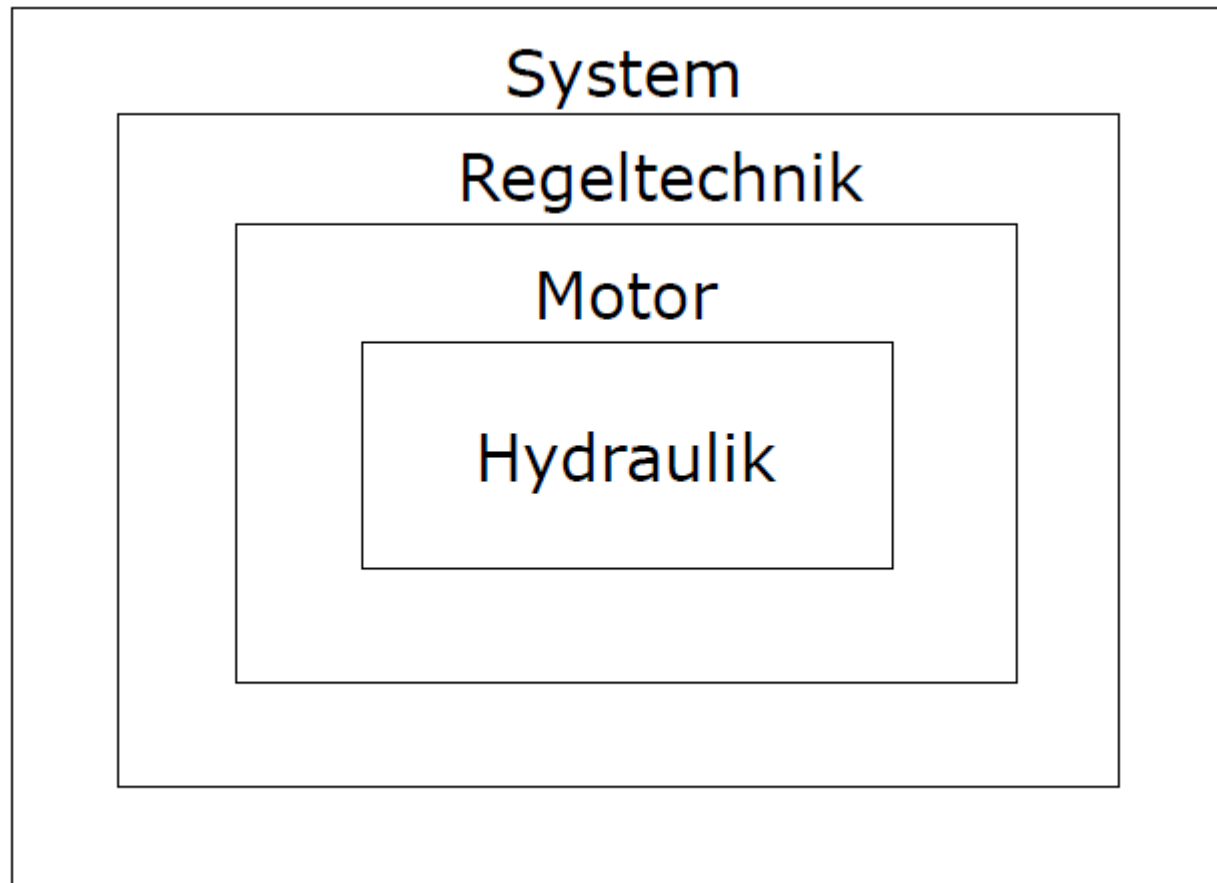
(Technisches) System:

- Zusammenstellung von Elementen
- Strömungsmaschine als System (Maschine mit ihren Bauteilen)
- Strömungsmaschine als Element im System (Maschine als Teil einer Anlage)

Element:            Bestandteil eines Systems

Systemgrenze: Abgrenzung eines Systems von seiner Umgebung

# Strömungsmaschine im System

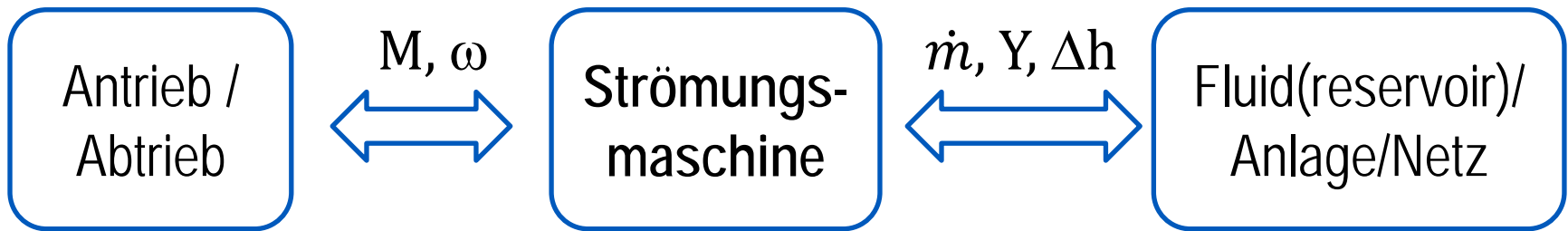


# Strömungsmaschine im System

## Stellung der Strömungsmaschine im System:

- Anforderungen des Systems an die Strömungsmaschine
- Bauform der Strömungsmaschine zur Erfüllung dieser Anforderungen
- Zu- oder Abfuhr der mechanischen Energie
- Regelung der Strömungsmaschine bzw. der Anlage

# Strömungsmaschine im System



Leistung auf der Fluidseite:

$$P = \dot{m} \cdot Y; \quad P = \dot{m} \cdot \Delta h$$

Leistung auf der Maschinenseite:

$$P_K = M \cdot \omega$$

## 7.2 Anlagenkennlinie für inkompressible Strömungen

Wie wird der Anlagenbedarf ermittelt?

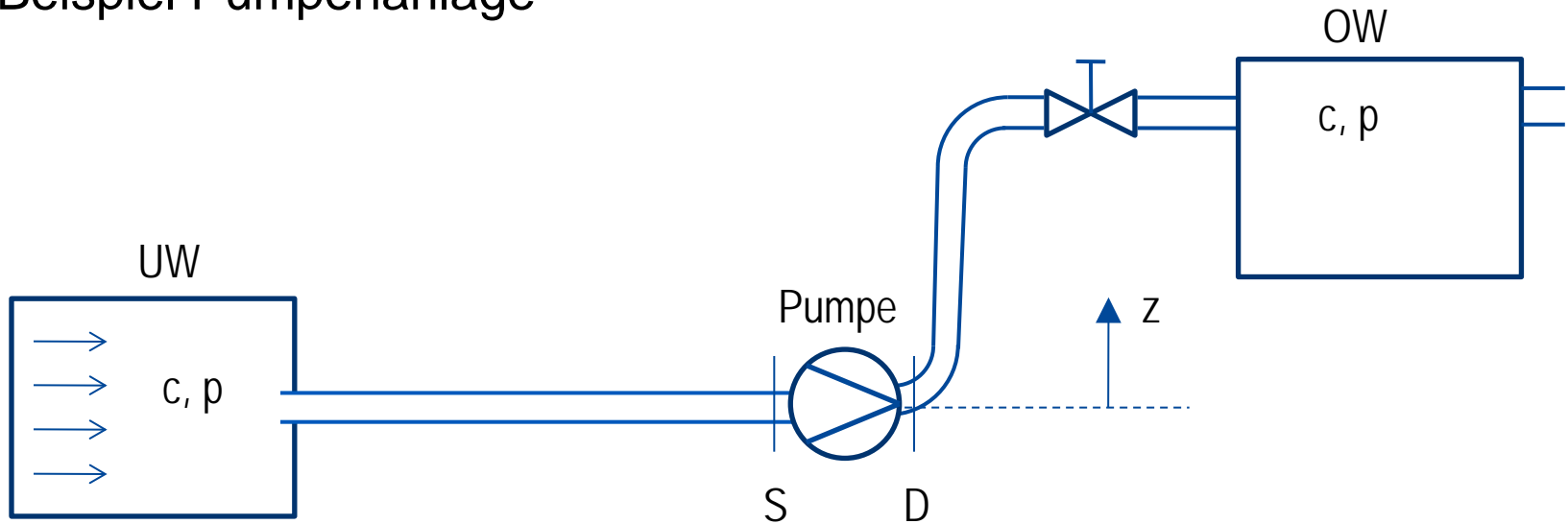
# Anlagenkennlinie

## Unterteilung der Anlagen in

- offene Systeme
  - Pumpspeicherwerk
  - Wasserhebwerke
  - Wandlüfter
  - Schiffspropeller
- geschlossene Systeme (Kreisläufe)
  - Heizkreislauf
  - Blutkreislauf

# Anlagenkennlinie

## Beispiel Pumpenanlage



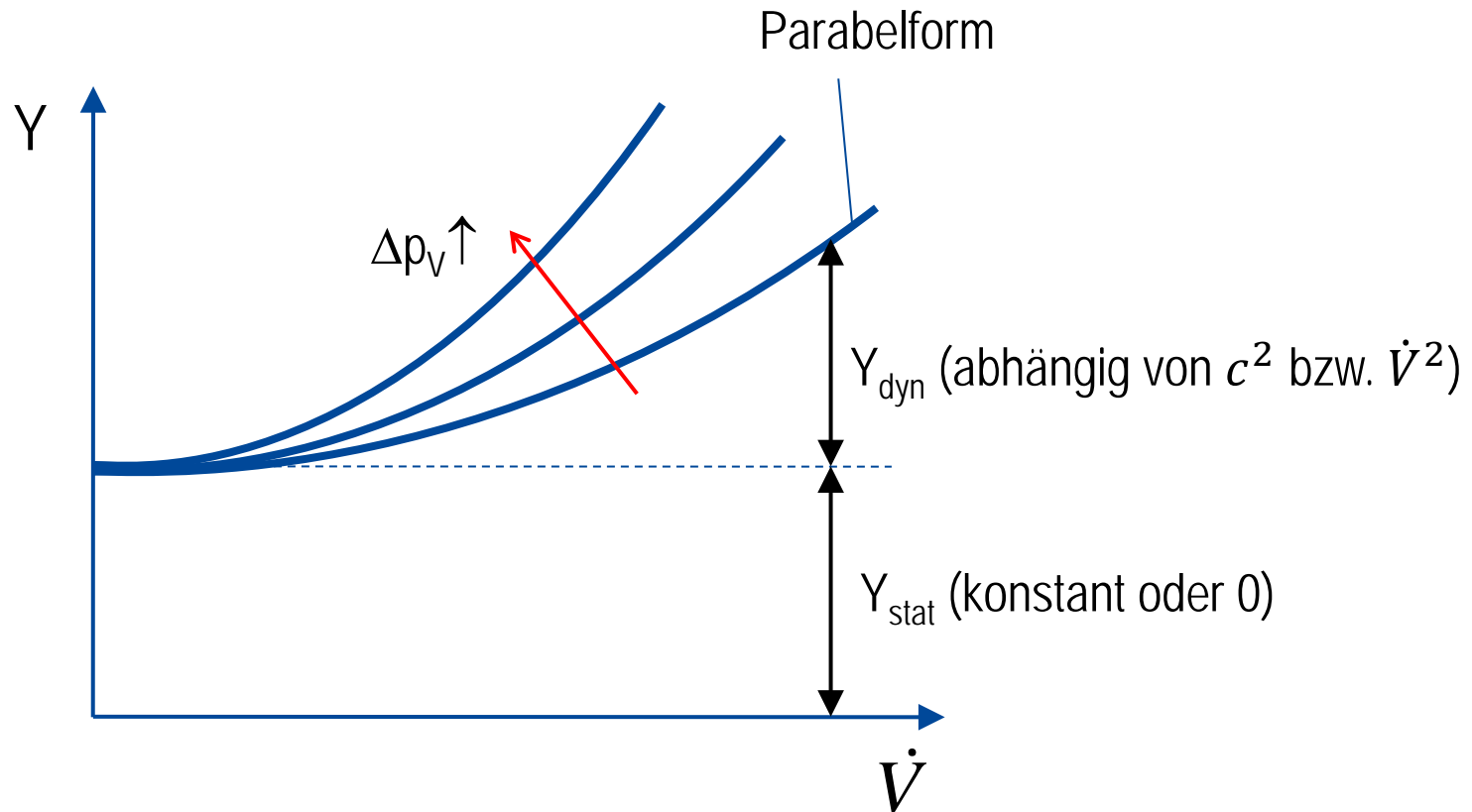
$$Y = \underbrace{\frac{p_{OW} - p_{UW}}{\rho} + g(z_{OW} - z_{UW})}_{\text{statischer Anteil } Y_{stat}} + \underbrace{\frac{c_{OW}^2 - c_{UW}^2}{2} + \frac{\Delta p_V}{\rho}}_{\text{dynamischer Anteil } Y_{dyn}}$$

mit dem Druckverlust in der Anlage:  $\Delta p_V$

# Anlagenkennlinie

## Druckverluste in der Anlage:

- Reibungsverluste (abhängig von Durchmesser und Länge der Rohrleitung, Strömungsgeschwindigkeit, Reibungszahl)
- Druckverlust in Einbauten (Krümmer, Drosseln, Klappen, Abzweigungen, Filter)
- Stoßverlust durch plötzliche Querschnittsänderungen

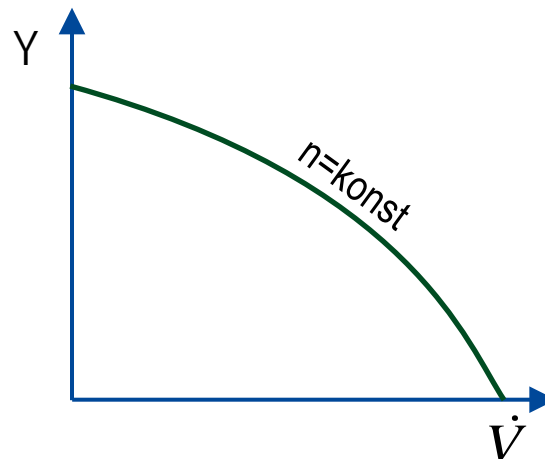


## 7.3 Kennlinien hydraulischer Strömungsmaschinen

Die charakteristische Kennlinie zum Kreiselpumpenbetrieb ist die sog. Drosselkurve:

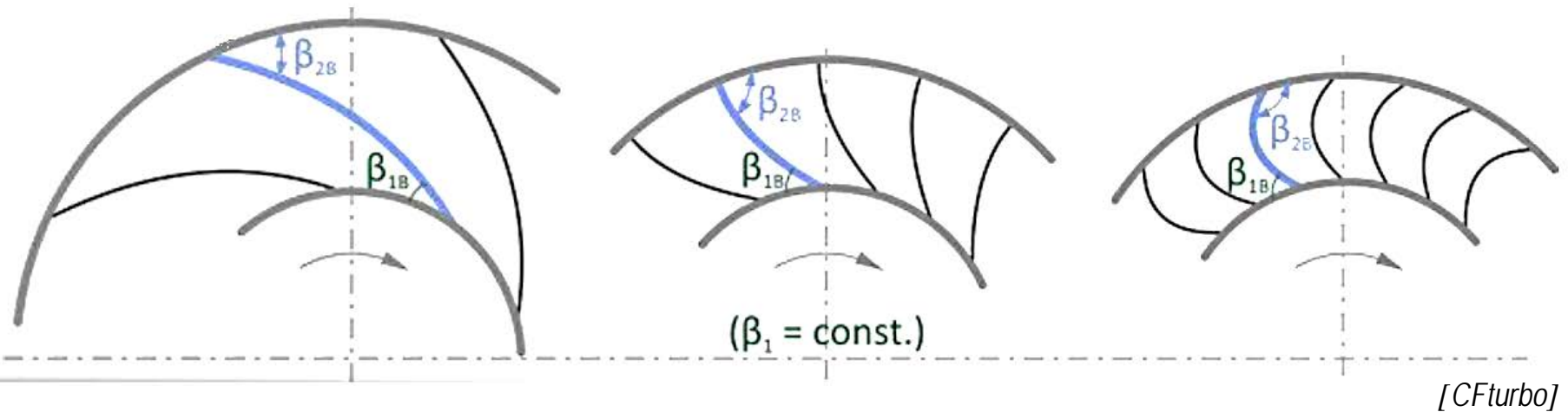
- Förderhöhe  $Y$  als Funktion des Förderstromes bei konstanter Drehzahl

$$Y = f(\dot{V}), \quad n = \text{konst}$$



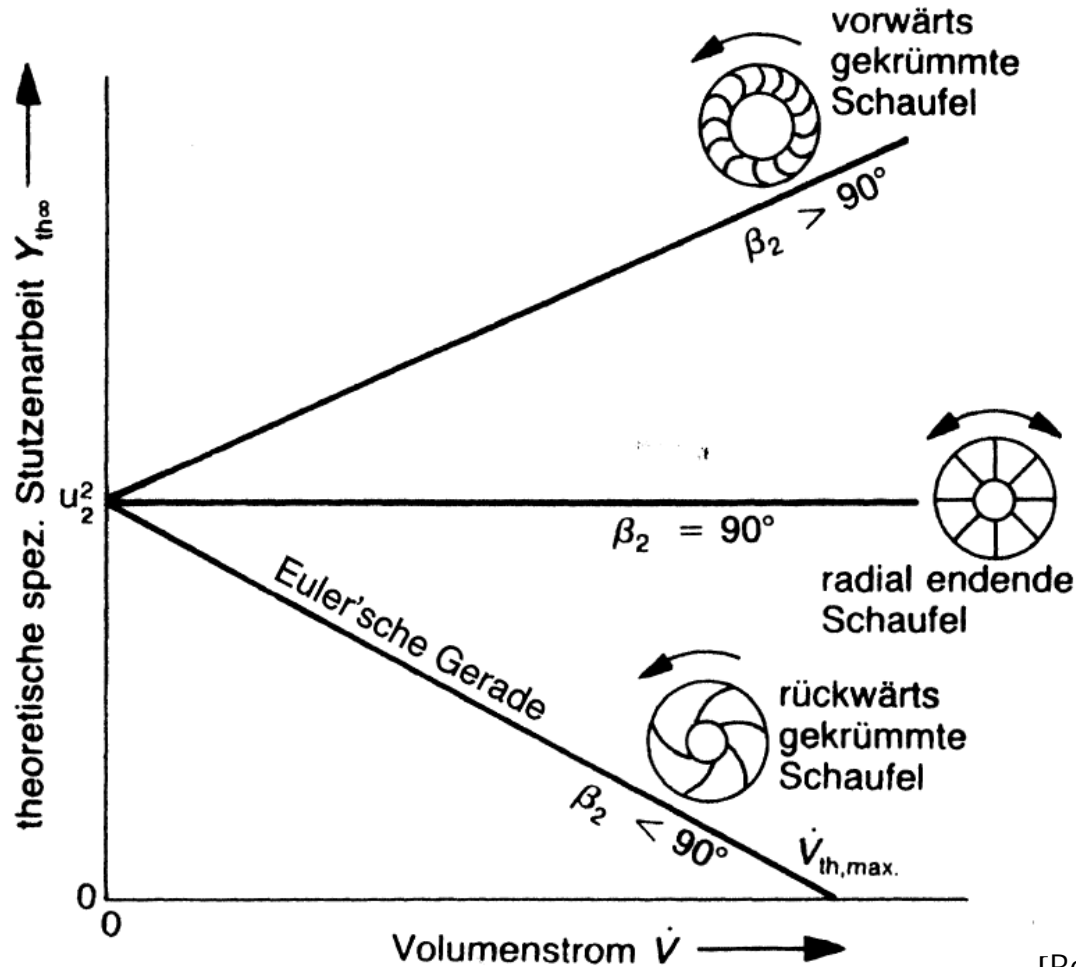
*Drosselkurve einer Radialpumpe*

## Einfluss des Schaufelwinkels $\beta_2$ auf die Drosselkurve



Schaufelform	Rückwärts gekrümmt	Radial endend	Vorwärts gekrümmt
Schaufelaustritt	$\beta_2 < 90^\circ; c_{2u} < u_2$	$\beta_2 = 90^\circ; c_{2u} = u_2$	$\beta_2 > 90^\circ; c_{2u} > u_2$
Wirkungsgrad	hoch	mittel	niedrig

## Einfluss des Schaufelwinkels $\beta_2$ auf die Drosselkurve



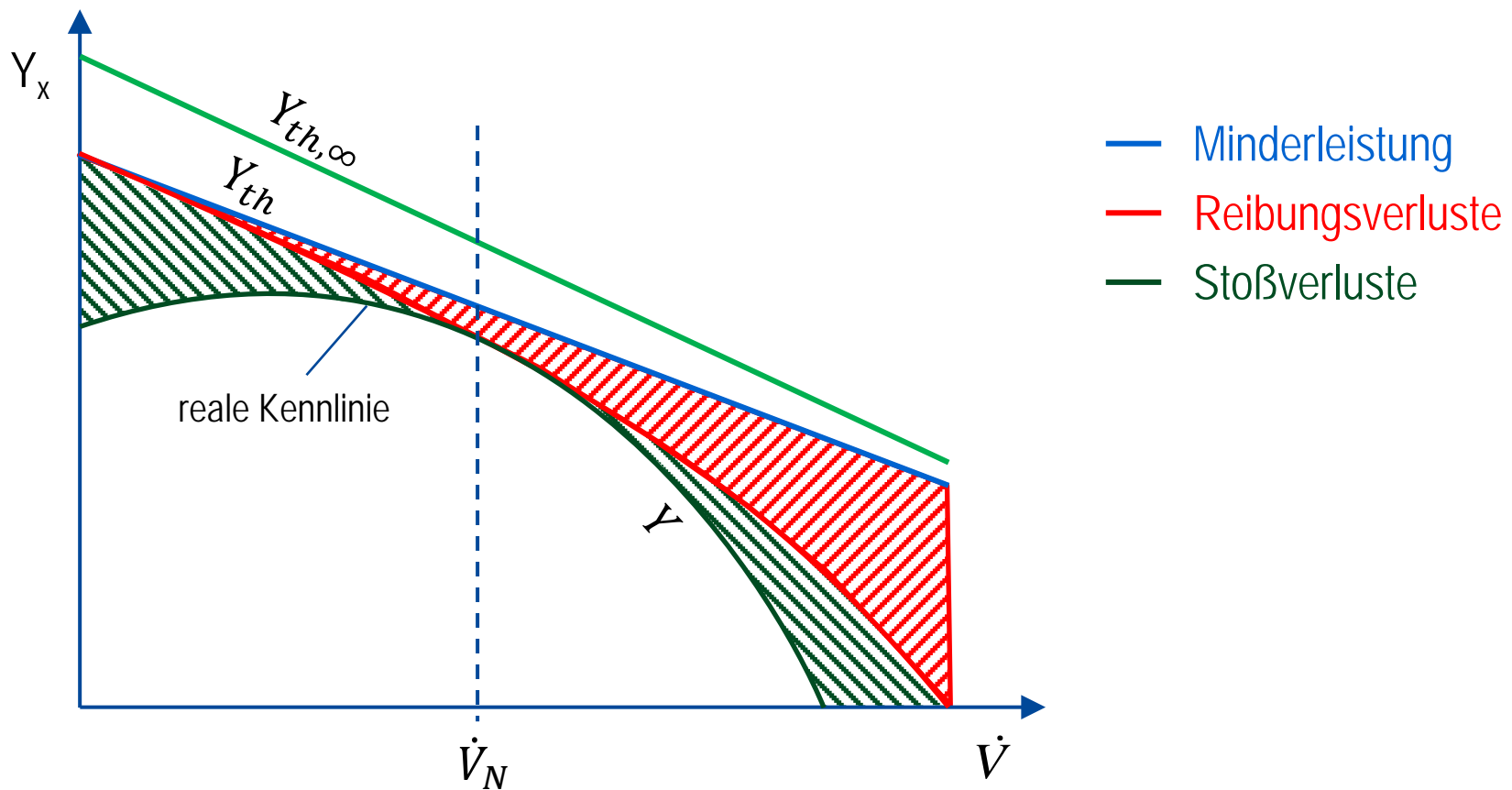
[Bohl: Strömungsmaschinen1, 2013]

## Reale Drosselkurve

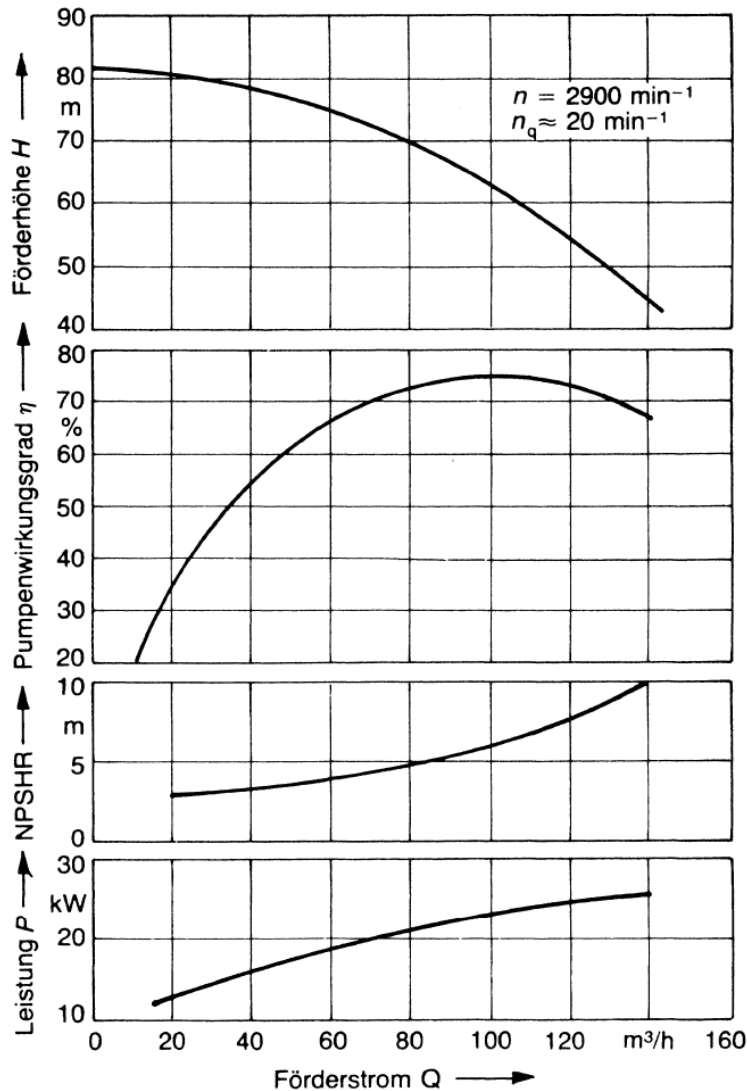
Berücksichtigung folgender Einflüsse und Verluste:

- Minderleistung
- Fluidreibung in allen strömungsführenden Bauteilen
- Stoßverluste am Eintritt von Lauf- und Leitrad
- Spaltverluste am Laufradspalt

## Reale Drosselkurve (rückwärts gekrümmte Schaufeln)



# Kennlinien hydraulischer Strömungsmaschinen



Kennfelder einer radialen Kreiselpumpe:

Drosselkurve:  $H = f(\dot{V})$

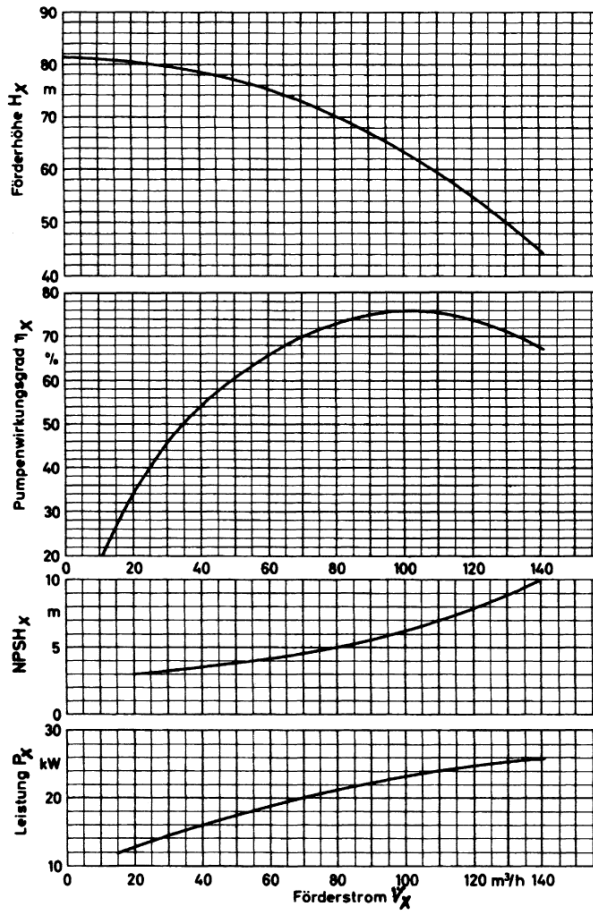
Wirkungsgradkurve:  $\eta = f(\dot{V})$

NPSH<sub>R</sub>-Kurve:  $NPSH_R = f(\dot{V})$

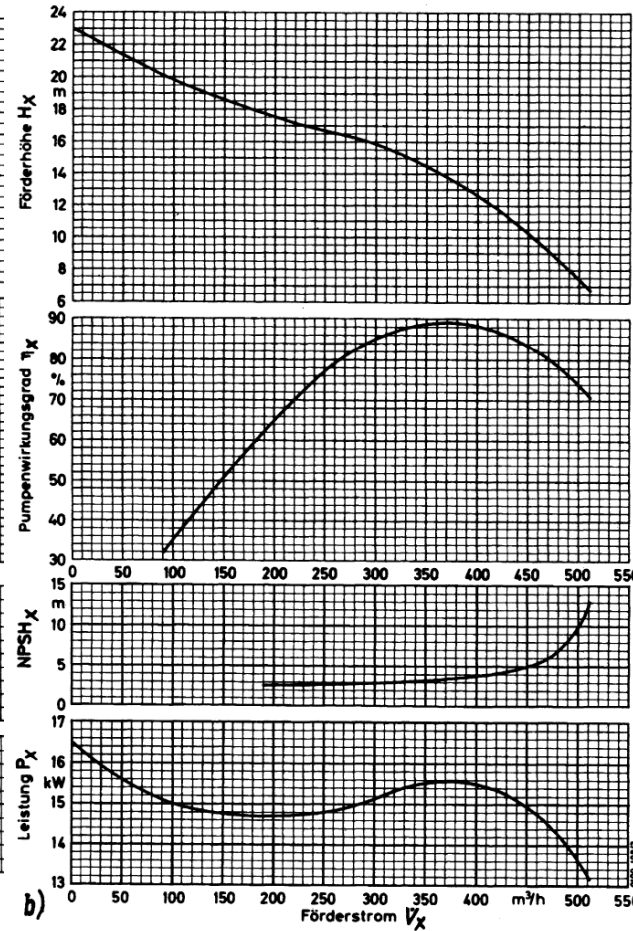
Leistungskurve:  $P = f(\dot{V})$

[Bohl: Strömungsmaschinen1, 2013]

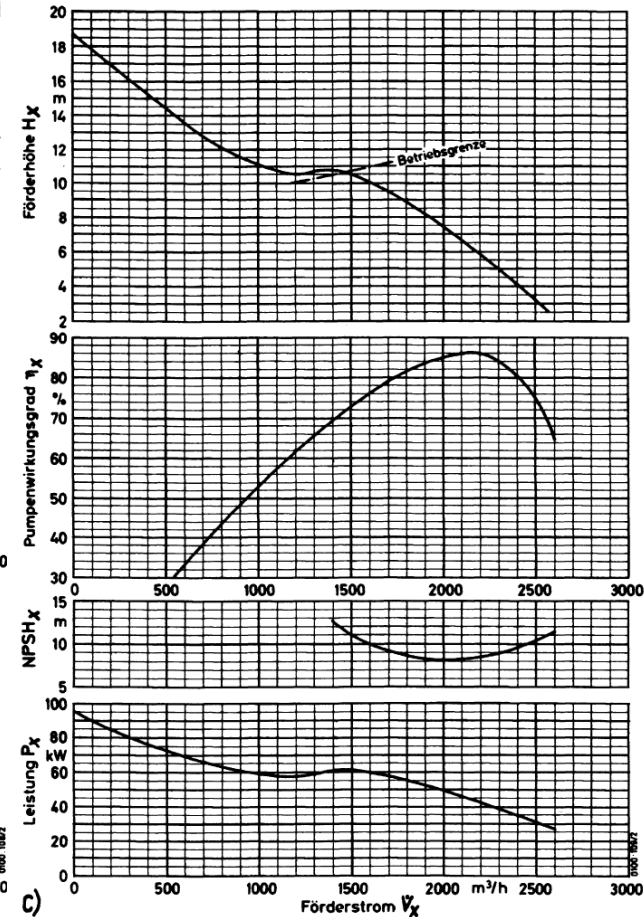
# Kennlinien hydraulischer Strömungsmaschinen



Radialpumpe



Diagonalspumpe

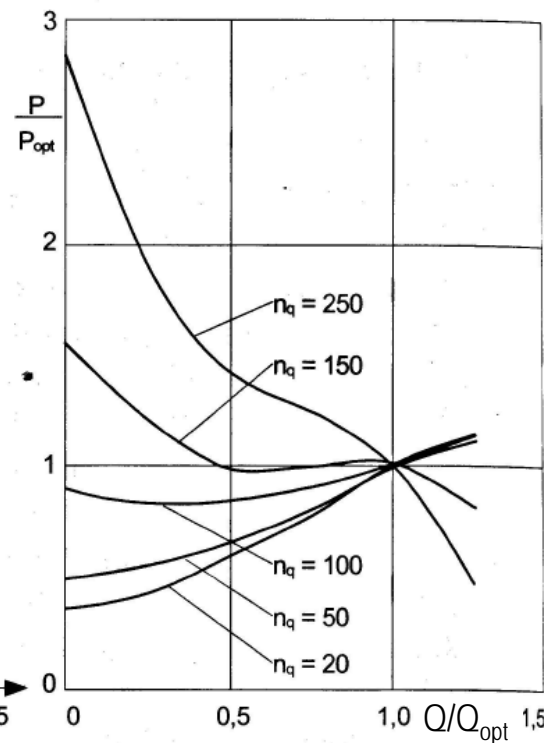
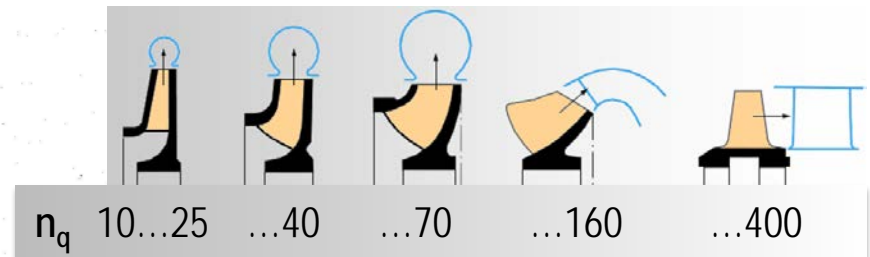
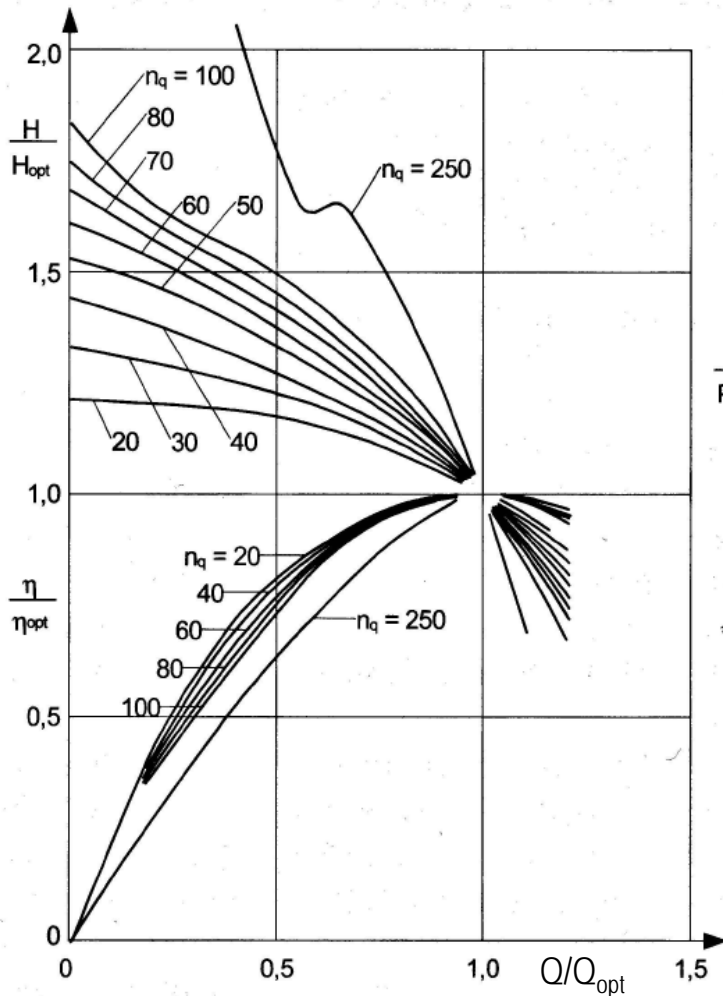


Axialpumpe

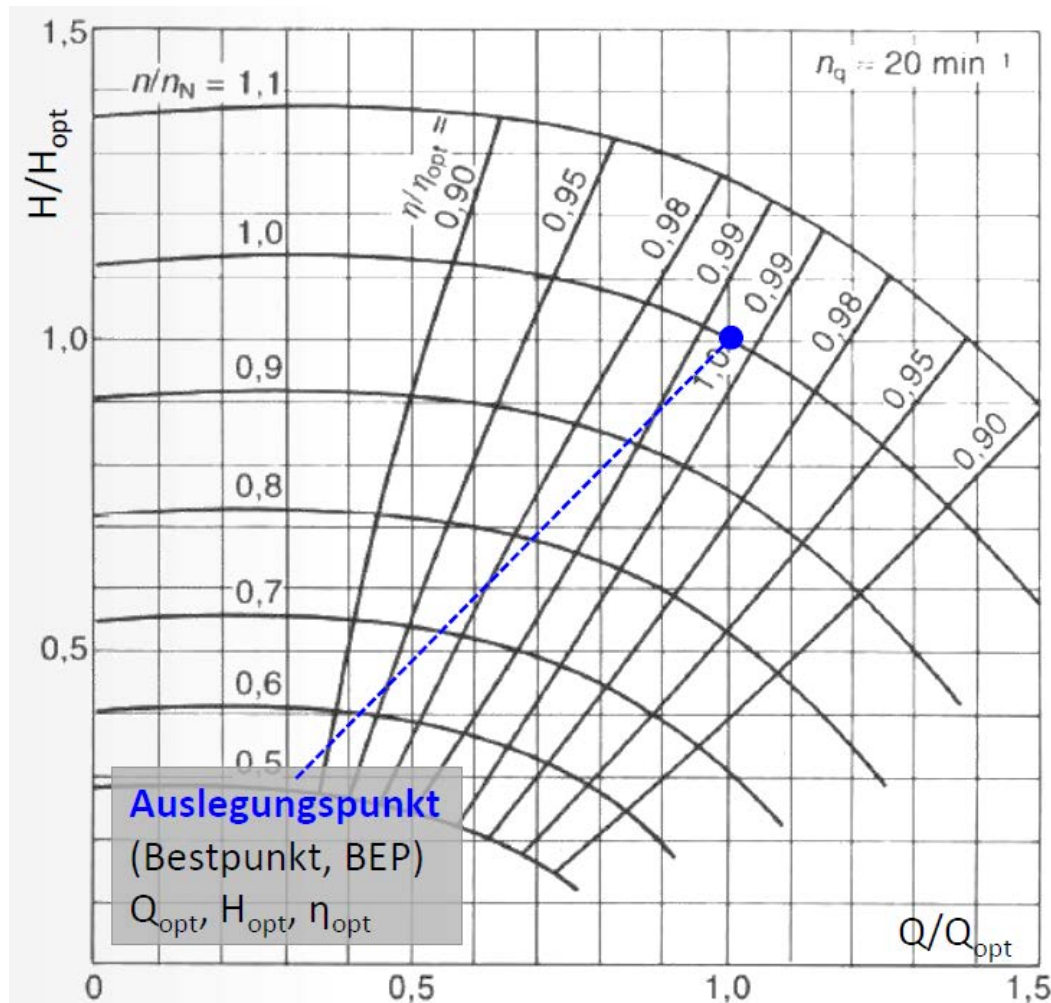
[Sigloch: Strömungsmaschinen]

# Kennlinien hydraulischer Strömungsmaschinen

## Einfluss der spezifischen Drehzahl (Lauf­rad­form) auf die Pumpenkennlinien



## Kennfeld einer Pumpe (Drosselkurven, Wirkungsgradkurven)

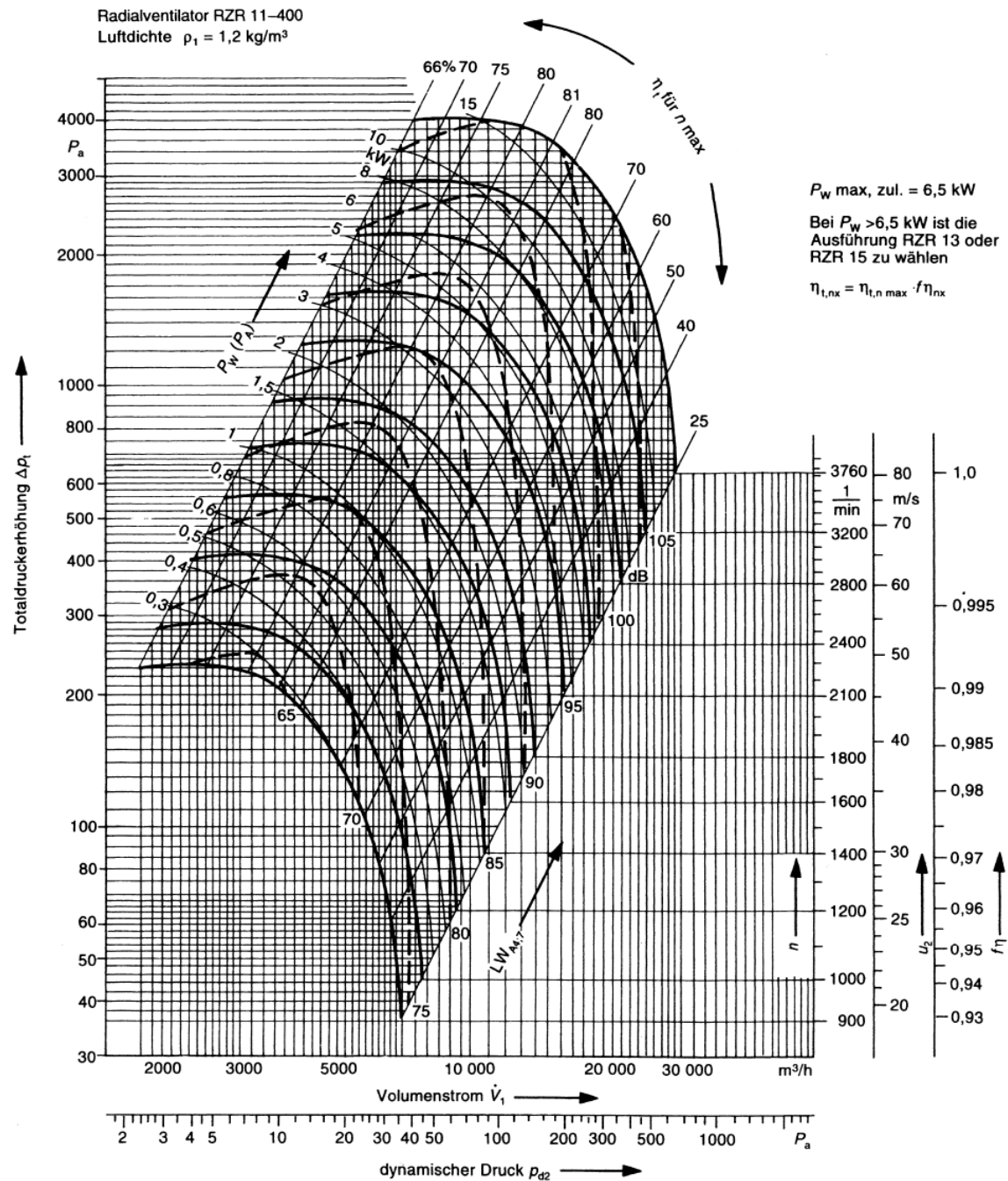


$$\dot{V} \sim n$$

$$H \sim n^2$$

$$P \sim n^3$$

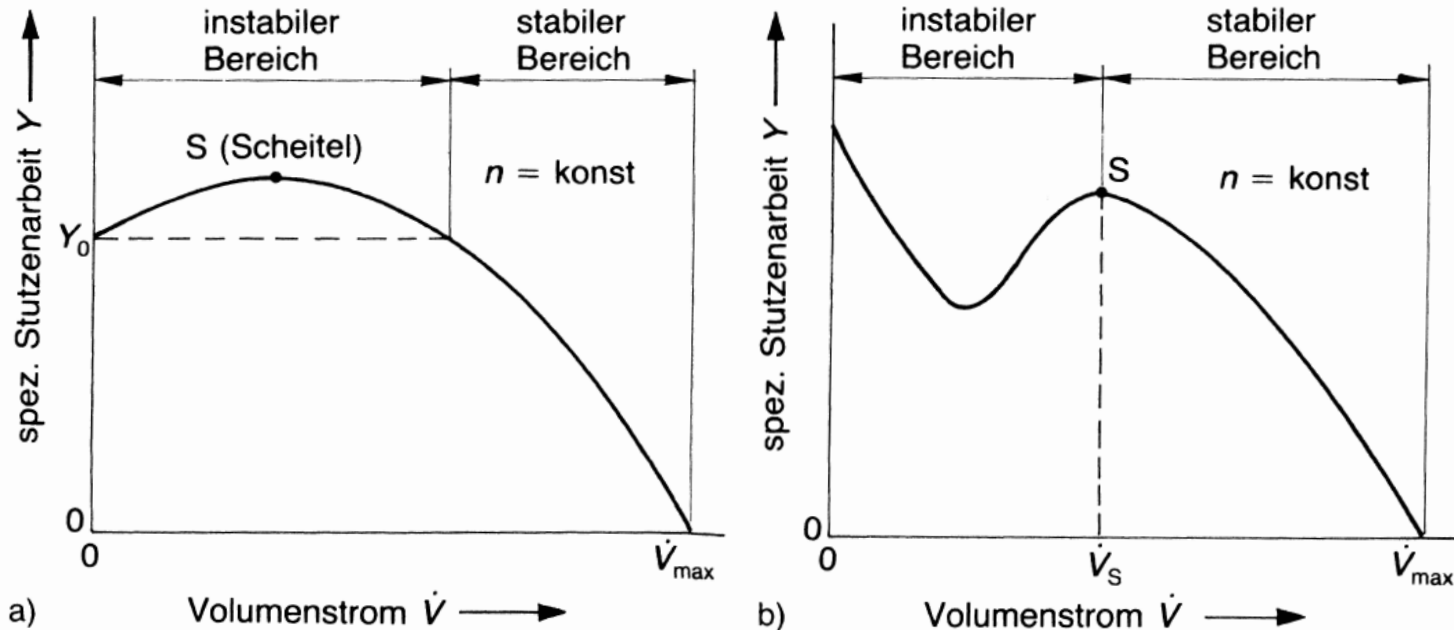
# Kennfeld eines Radialventilators



[Bohl: Strömungsmaschinen1, 2013]

## Stabile und instabile Kennlinienbereiche

- Stabiler Bereich: Jedem Volumenstrom kann nur eine Stutzenarbeit zugeordnet werden.



*instabile Drosselkurven a) Radialmaschinen, b) Axialmaschinen*

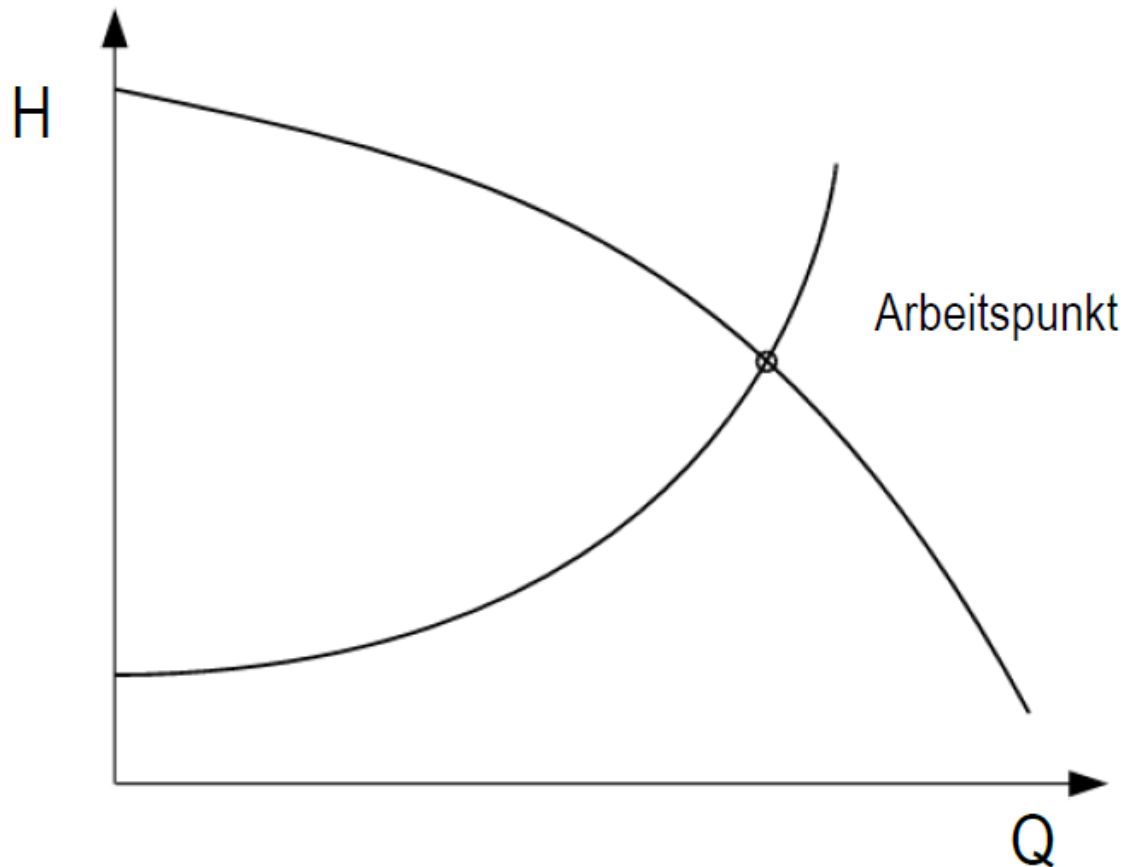
[Bohl: Strömungsmaschinen1, 2013]

## Stabile und instabile Kennlinienbereiche

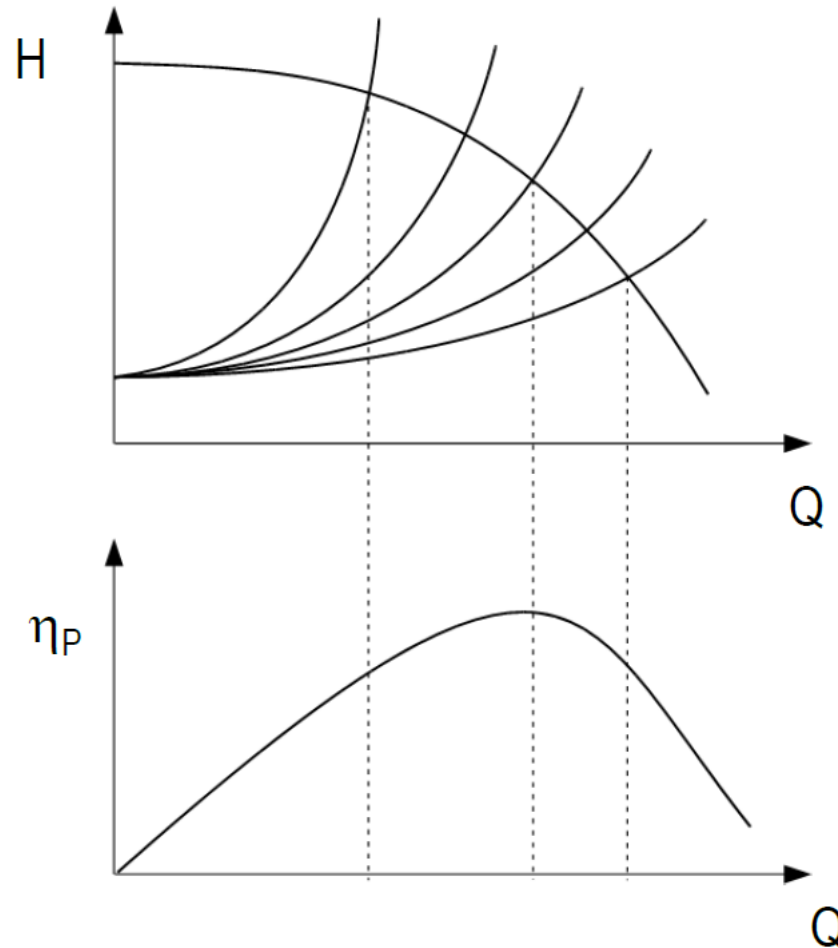
- Eine Strömungsmaschine darf nur auf dem stabilen Teil der Drosselkurve betrieben werden!
- Eine weitere Unstetigkeit ist der Strömungsabriss (Pumpgrenze, rotierende Ablösung)
  - ↳ wird in der Vorlesung „Hydraulische Strömungsmaschinen“ behandelt

## 7.4 Betriebspunkt-Anpassung

## Maschine - Anlage



## dynamischer Anlagenbedarf



# Betriebspunkt-Anpassung

## Regelung einer Pumpe

Ziel: Betriebspunkt = Auslegungspunkt (besten Wirkungsgrad)

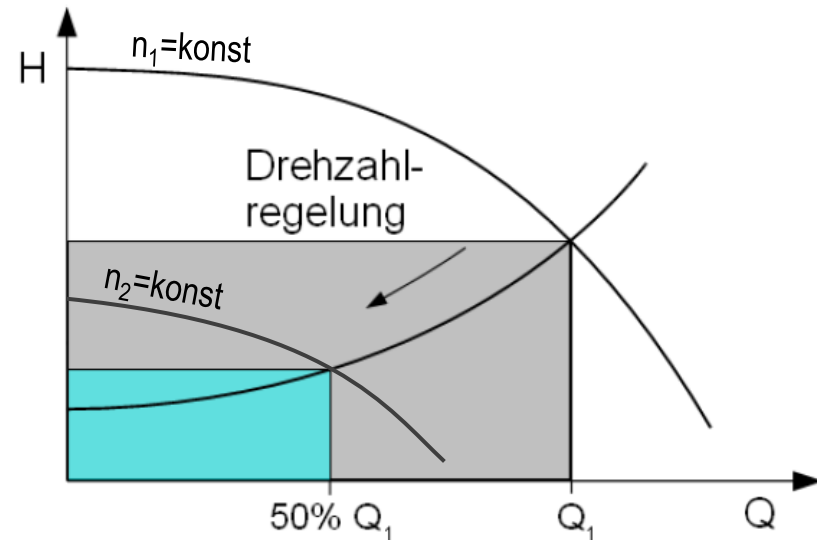
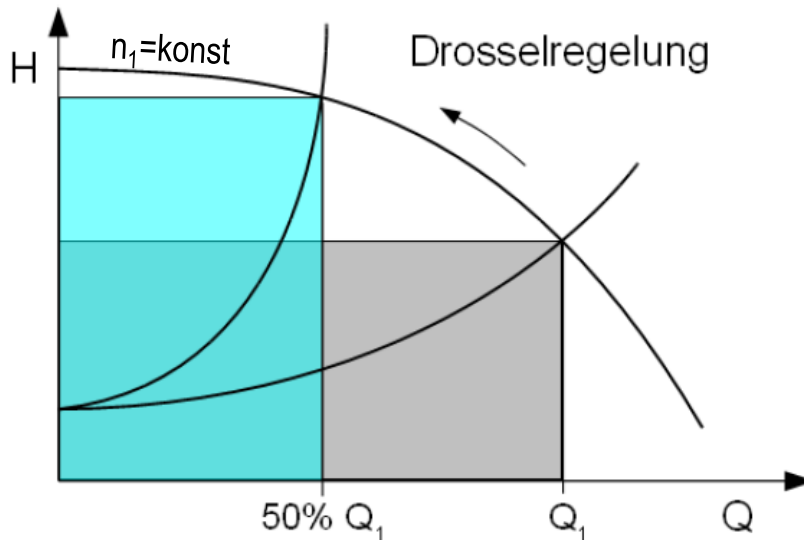
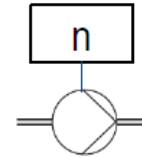
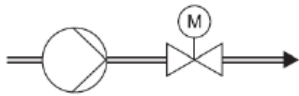
### Anlage

- Drosselung
- Bypass

### Pumpe

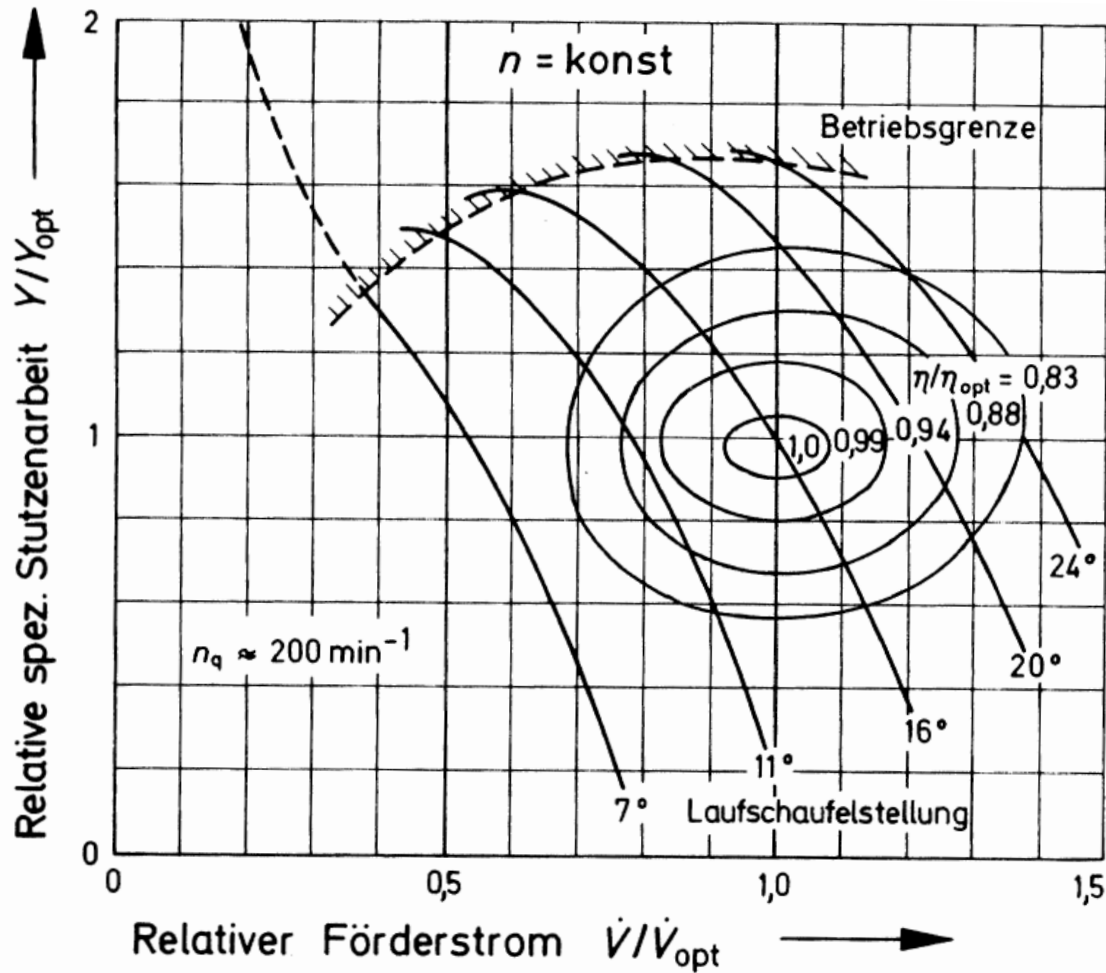
- Drehzahl
- Laufschaufelverstellung
- Leitschaufelverstellung
- Parallelschaltung
- Reihenschaltung
- Start-Stopp

## Gegenüberstellung Drossel- und Drehzahlregelung



Ziel: 50% von  $Q_1$

## Laufschaufelverstellung



Kennfeld einer laufschaufelgeregelten Axialpumpe

[Bohl: Strömungsmaschinen1, 2013]

## Betriebspunkt-Anpassung

- ausführliche Betrachtung der Betriebspunktanpassung in den weiterführenden Vorlesungen „Hydraulische und Thermische Strömungsmaschinen“