

# Grundlagen der Strömungsmaschinen und Windturbinen

Einführung, Historie, Aufbau und  
Wirkungsweise

Lehrstuhl Strömungsmaschinen

# Gliederung der Vorlesung

1. Einführung, Einteilung, Historische Entwicklung, Aufbau und Wirkungsweise
2. Strömungsmechanische Grundlagen
3. Ähnlichkeitsmechanik
4. Energieübertragung am Rotor, Ableitung der Eulerschen Turbomaschinengleichung
5. Bestimmung der Hauptabmessungen, Entwurfsschritte
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

# Literatur

- Sigloch: „Strömungsmaschinen“
- Fister, Werner: „Fluidenergiemaschinen, Band 1“
- Gülich, J.F.: „Kreiselpumpen“
- Pfeleiderer, C.; Petermann, H.: „Strömungsmaschinen“
- Hau, E.: „Windkraftanlagen“
- Bräunling, W.J.G.: „Flugzeugtriebwerke“

# Einführung

# Einführung

- Was ist eine Strömungsmaschine?
- Welche Pumpe passt in eine bestehende Anlage?
- Warum wird Strom fast ausschließlich mit Dampfturbinen erzeugt?
- Weshalb eignen sich Gasturbinenanlagen als Triebwerke für Flugzeuge?
- Wieviel Energie kann eine Windkraftanlage dem Wind entziehen?

## Bedeutung der Strömungsmaschine

- Wo werden Strömungsmaschinen eingesetzt?
  - Haushalt
  - Kommune
  - Industrie / Transport / Verkehr

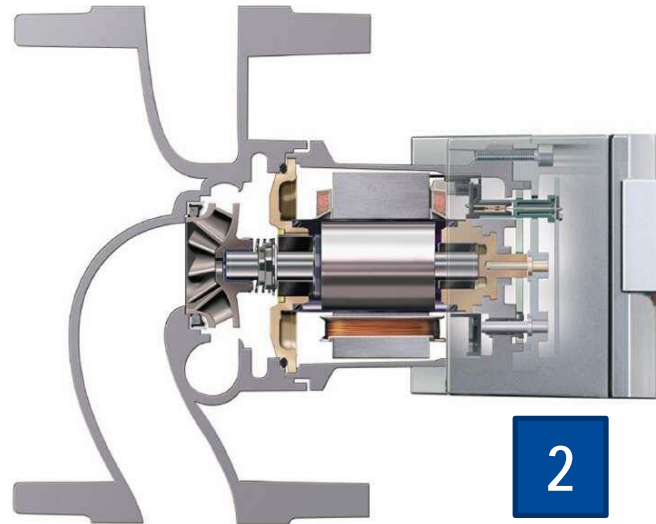
| Anwendung | Strömungsmaschine |
|-----------|-------------------|
|           |                   |
|           |                   |
|           |                   |
|           |                   |
|           |                   |
|           |                   |
|           |                   |
|           |                   |

Tafel1

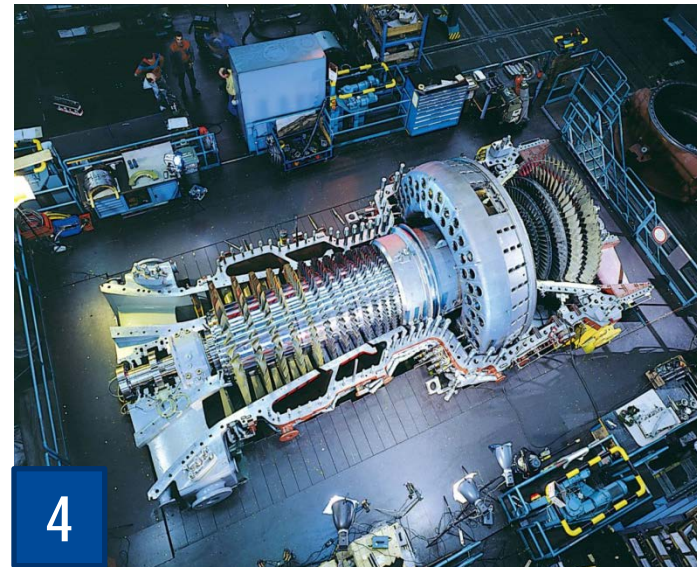
## Bedeutung der Strömungsmaschine

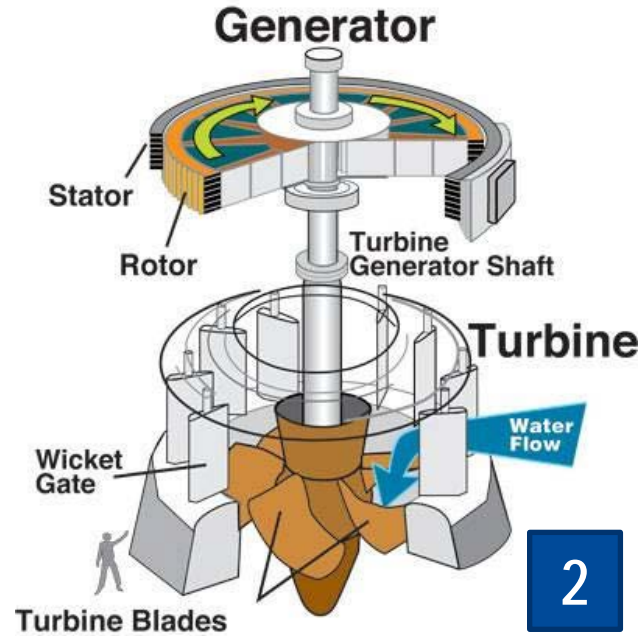
- Strömungsmaschinen haben eine überragende Bedeutung für die Zivilisation.
- Sicherung elementarer Lebensbedürfnisse
  - Annehmlichkeiten und Luxus
  - über 90 % der Elektroenergieerzeugung erfolgt mit Strömungsmaschinen

„Von der Dosierpumpe bis zum Großkraftwerk“

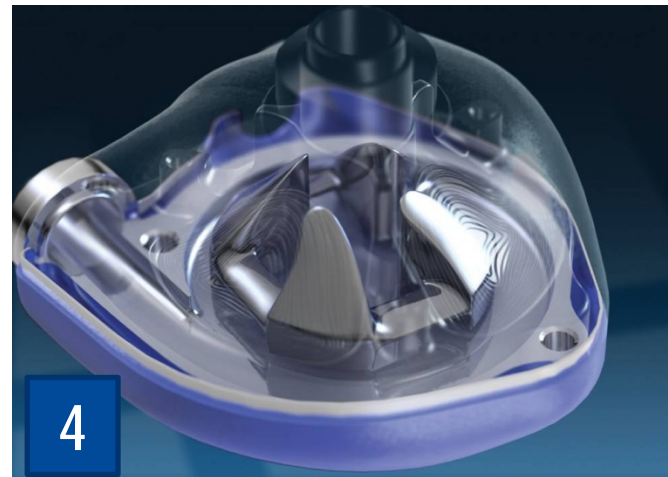
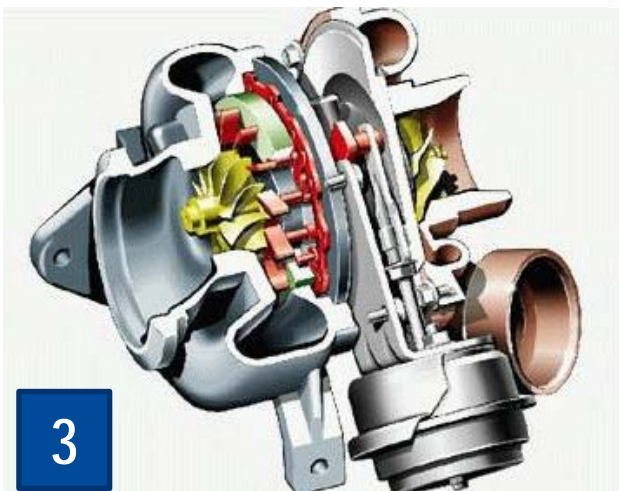


1. Propeller
2. Pumpe
3. Windkraftanlage
4. Gasturbine





1. Dampfturbine
2. Wasserturbine
3. Abgasturbolader
4. Herzpumpe



## Strömungsmaschinen-Industrie in Deutschland: Pumpen

- Deutschland exportiert jährlich Pumpen im Wert von 4,8 Mrd. € [VDMA 2012] (Weltmarktführer)
- Weltweit werden Pumpen im Wert von 29 Mrd. € gehandelt [VDMA 2012]
- ca. 19.000 Beschäftigte in Pumpenproduktion in Deutschland
- Auswahl an Firmen mit Produktion in Deutschland:
  - Grundfos
  - KSB
  - Wilo
  - Sterling SIHI

## Strömungsmaschinen-Industrie in Deutschland: Windenergie

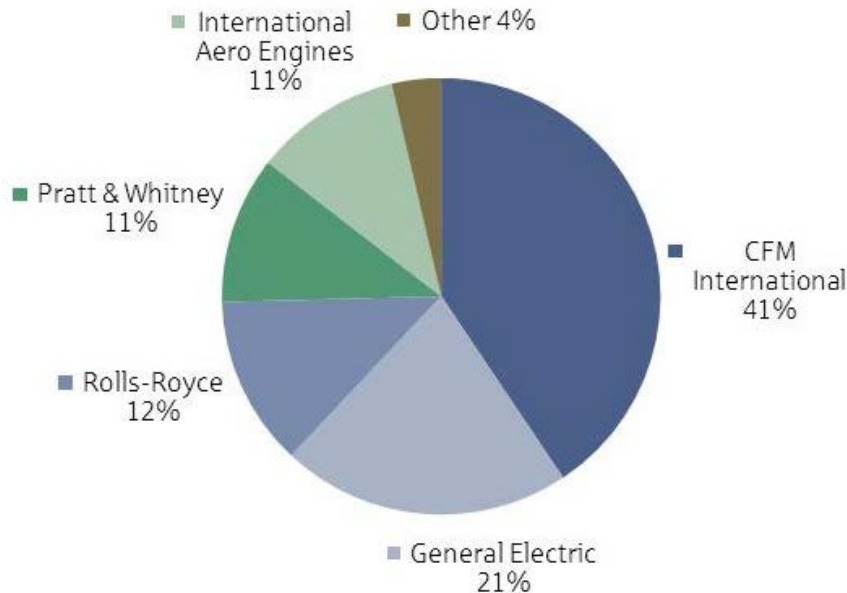
| Bereich                          | 2012                         | 2011          |
|----------------------------------|------------------------------|---------------|
| Installierte Gesamtleistung      | 31.307,60 MW                 | 29.060,04 MW  |
| Neubau an installierter Leistung | 2.415,16 MW                  | 2.085,72 MW   |
| Anlagenzahl                      | 23.030                       | 22.297        |
| Repowering (abgebaut)            | 178,56 MW                    | 123 MW        |
| Repowering (dafür aufgebaut)     | 431,63 MW                    | 238MW         |
| Neue aufgebaute Anlagen          | 998                          | 895           |
| Stromproduktion durch WEA        | 46 Mrd. kWh                  | 48,9 Mrd. kWh |
| Anteil am Stromverbrauch         | 7,3 % (vorläufige Schätzung) | 8,0 %         |

*[<http://www.wind-energie.de/infocenter/statistiken>]*

## Strömungsmaschinen-Industrie in Deutschland:

### Triebwerksproduktion weltweit:

- Für den Zeitraum 2012 bis 2031 prognostiziert Rolls-Royce die Auslieferung von 149.000 Triebwerken mit einem Gesamtwert von rund 975 Mrd. USD, die für den Antrieb von 68.000 Verkehrsflugzeugen und Businessjets benötigt werden.



*Weltweiter Marktanteil Triebwerkhersteller (Stand Mai 2013)*

## Strömungsmaschinen-Industrie in Deutschland:

### **Triebwerksproduktion:**

- MTU (ca. 7.500 MA; ca. 2,6 Mrd.€ Umsatz)
- Rolls Royce Deutschland (ca. 3.000 MA)

### **Dampf- und Gasturbinen:**

- MAN Turbo AG (12.500 MA; ca. 4 Mrd.€ Umsatz)
- Siemens Energy (88.000 MA; ca. 25 Mrd.€ Umsatz)

### **Windkraftanlagen:**

- ca. 100.000 Beschäftigte (Suzlon, Nordex in MV)

### **Lüfter:**

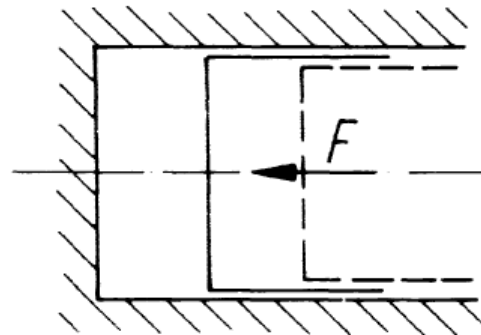
- Beschäftigte? (z.B. Ziehl Abegg) Weltmarktführer

# Systematik der Fluidenergiemaschinen

- Fluidenergiemaschinen führen Fluiden Arbeit zu bzw. entziehen ihnen Arbeit
- Der Begriff **Fluid** bezeichnet alle Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe
- Fluidenergiemaschinen werden unterteilt in
  - **Strömungsmaschinen**
  - Verdrängermaschinen
  - (Elektrisch wirkende Fluidenergiemaschinen wie Magneto-hydrodynamischer Generator und elektromagnetische Pumpe)

## Verdrängermaschinen:

- Arbeitsübertragung vorwiegend durch Volumenänderungsarbeit
  - geschlossenes System mit beweglicher Systemgrenze (z.B. Zylinder mit Hubkolben)  $\rightarrow dV \neq 0$
  - Kolbenkraft beruht auf statischer Druckdifferenz  $\rightarrow$  statisches Arbeitsprinzip

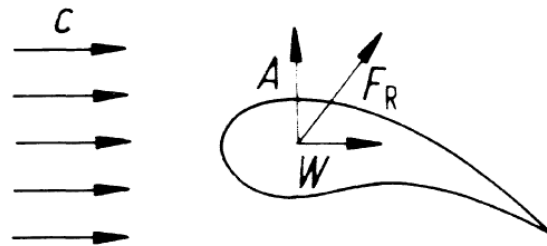


$F =$  Kolbenkraft

[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Strömungsmaschinen:

- Arbeitsübertragung über Druckänderungsarbeit:  $dp \neq 0$ 
  - offenes System
  - Umströmung eines Schaufelprofils bewirkt Änderung der Fluidgeschwindigkeit (Betrag und/oder Richtung) und damit Impulsänderung der Fluidteilchen  $\rightarrow$  Fluidkraft/Schaukelkraft
  - Schaufelkraft beruht auf dynamisch bedingten Druckunterschieden  $\rightarrow$  dynamisches Arbeitsprinzip



$A$  = Auftriebskraft

$W$  = Widerstandskraft

$F_R$  = Result. Fluidkraft

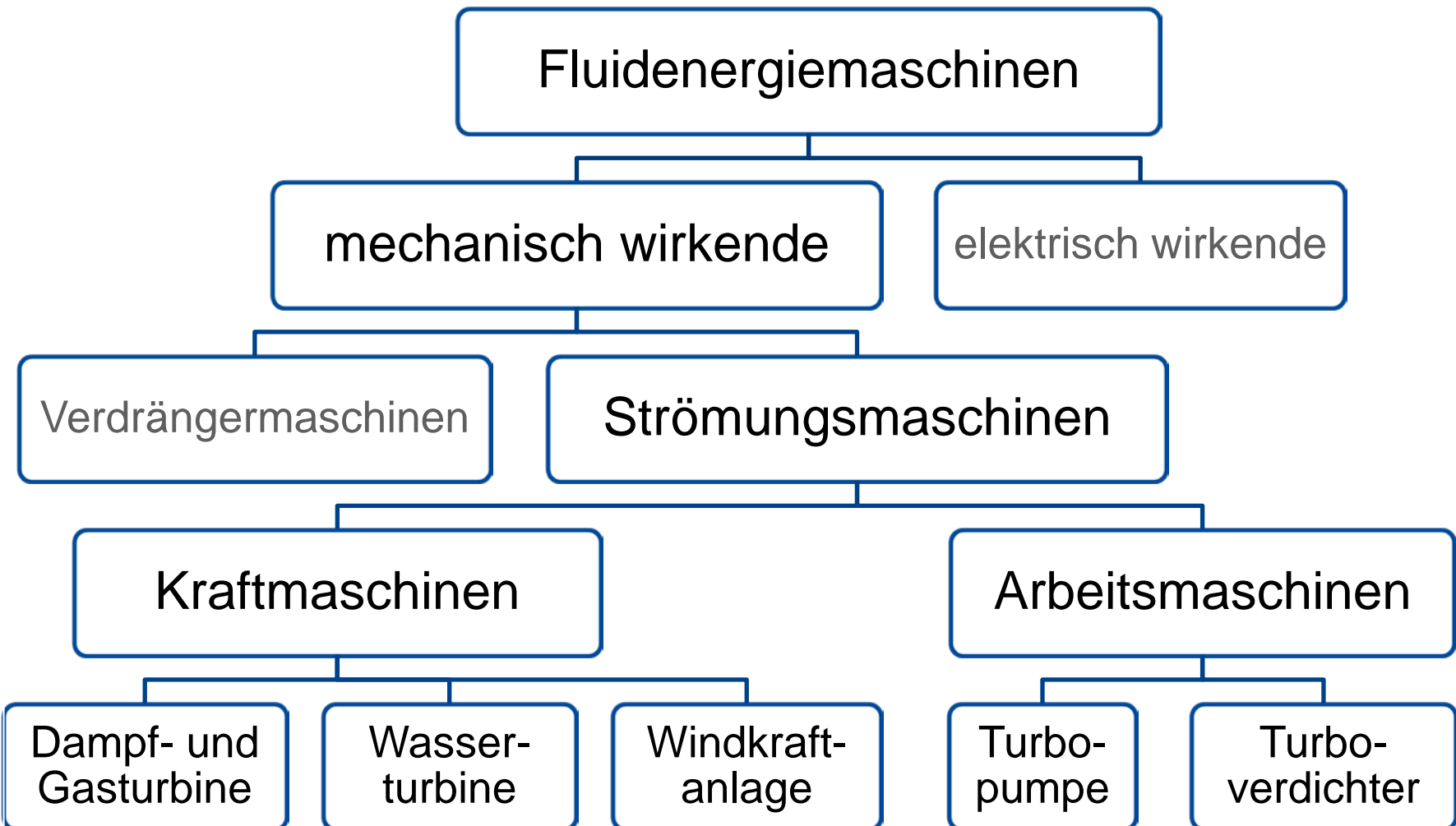
[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

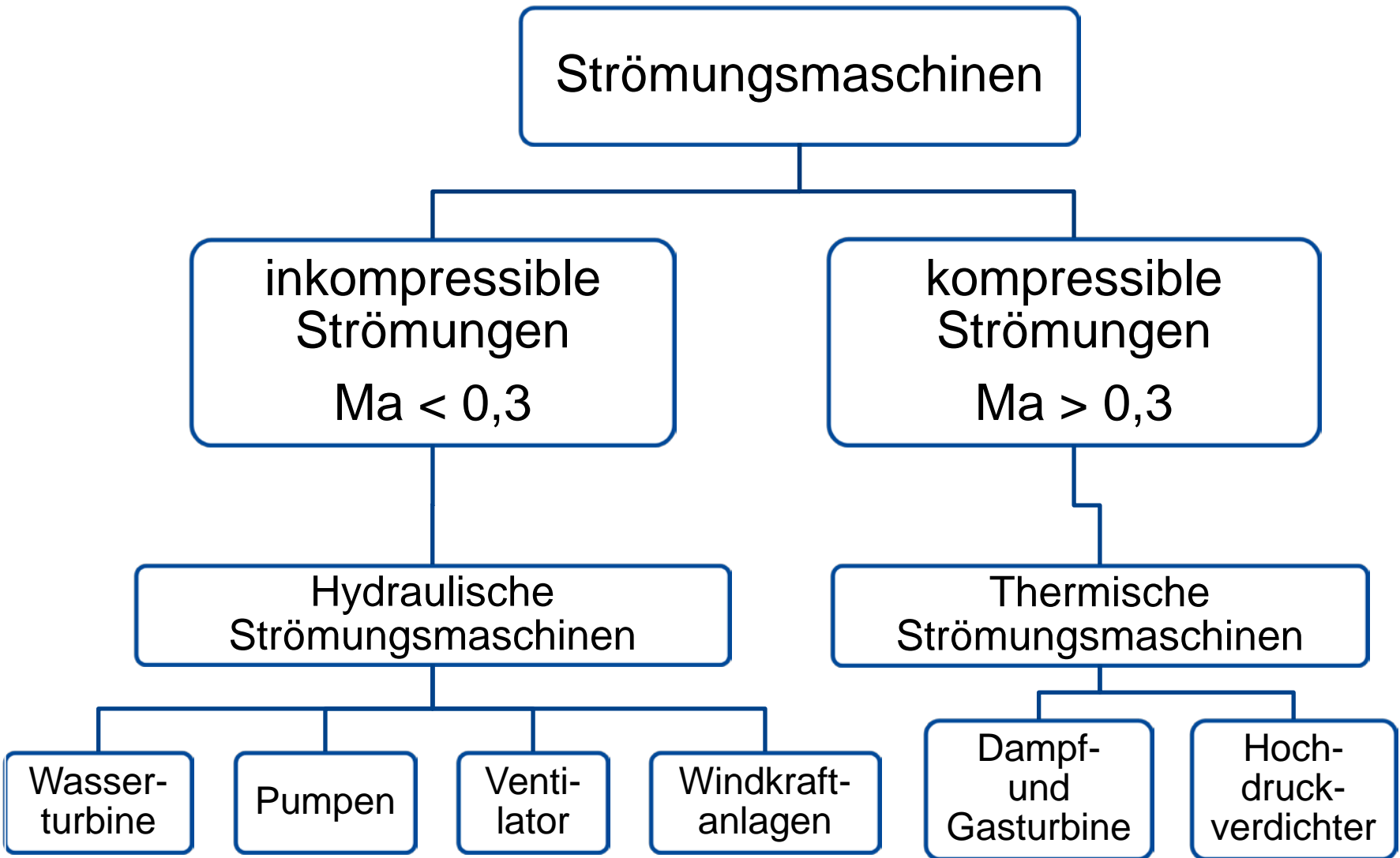
**wesentliche Vorteile** der Strömungsmaschinen im Vergleich mit Kolbenmaschinen:

- keine hin- und hergehenden Teile und Massenkräfte
- kontinuierliches Durchströmen
- höhere Drehzahlen
- große Durchsätze → sehr große Leistungen möglich
- kein direkter Kontakt zwischen Medium und Schmiermittel
- geringer Bauaufwand bezogen auf die Leistung (geringes Leistungsgewicht)

## Begriffe:

- Kraftmaschine: Fluidenergie wird in mechanische Energie gewandelt
- Arbeitsmaschine: mechanische Energie wird in Fluidenergie gewandelt
  
- kompressibles Fluid: unter Druckeinwirkung verringert sich das Volumen,  $\rho \neq konst$
- inkompressibles Fluid: keine Volumenänderung unter Druckeinwirkung,  $\rho = konst$



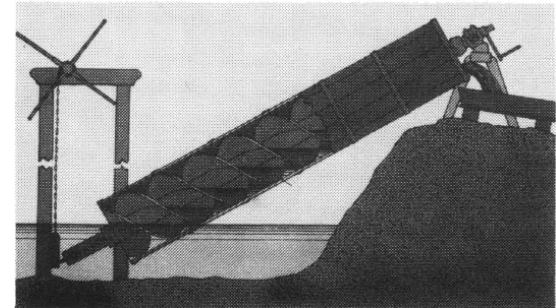


# Historische Entwicklung der Strömungsmaschinen

## Aufgabe: Wasser fördern/transportieren

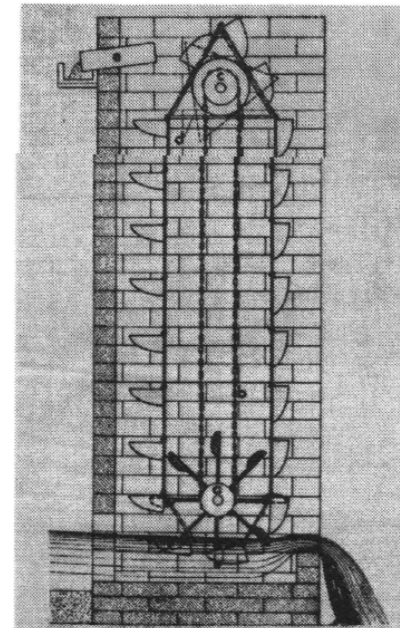
250 v. Chr.

Beschreibung einer ägyptischen Schraubenpumpe durch Archimedes



200 v. Chr.

unterschlächtiges Wasserrad mit Eimerketten-Wasserförderung

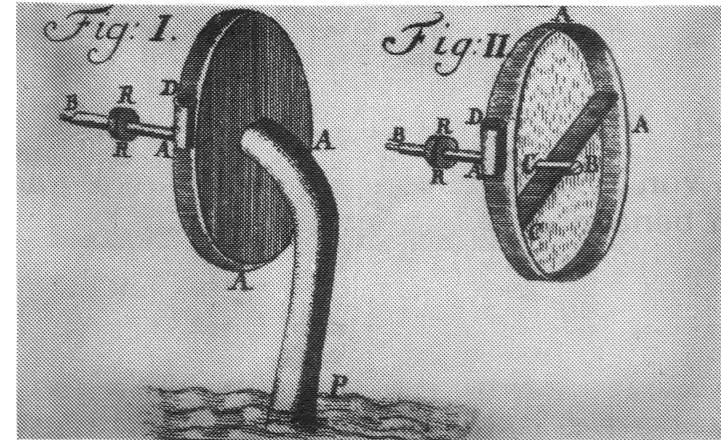


[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Aufgabe: Wasser fördern/transportieren

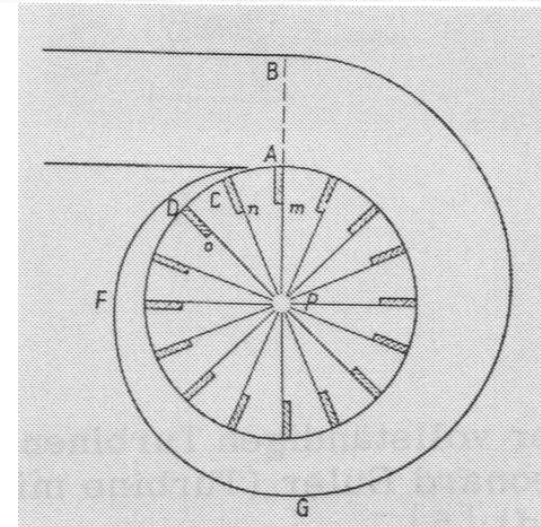
1689

Beschreibung einer Zentrifugalpumpe durch Denis Papin



1705

Bau einer Zentrifugalpumpe mit Spiralgehäuse durch Papin

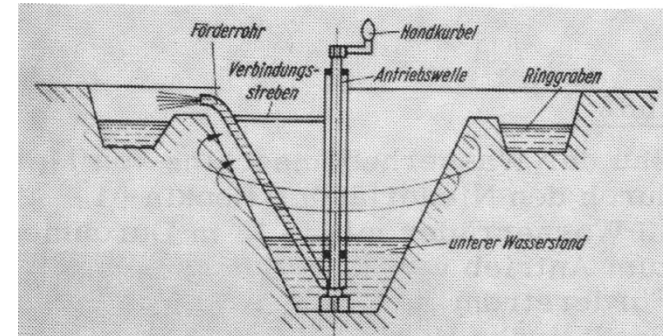


[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Aufgabe: Wasser fördern/transportieren

1732

Zentrifugalpumpe mit vertikaler Welle nach LeDemour



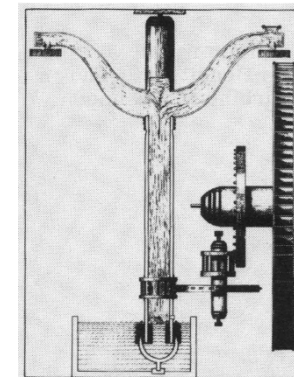
1750 – 1754

Begründung der vollständigen Turbinentheorie durch Leonard Euler (1707 – 1783)



1794

Weiterentwicklung der Zentrifugalpumpe

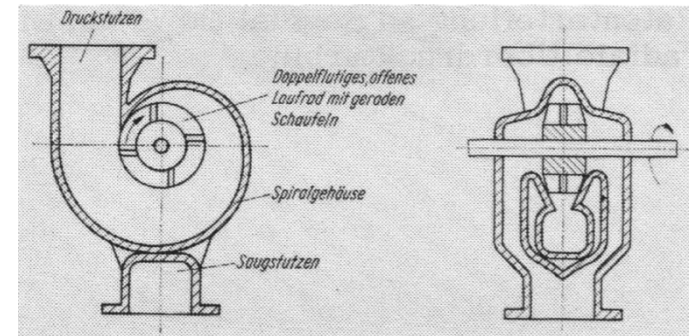


[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Aufgabe: Wasser fördern/transportieren

1818

Produktion von Zentrifugalpumpen durch Massachusetts Pump



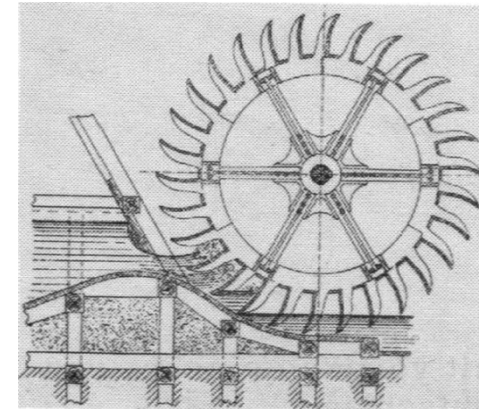
1846

Konstruktion einer dreistufigen Zentrifugalpumpe durch Johnson

## Aufgabe: mechanische Energie aus der Wasserkraft gewinnen

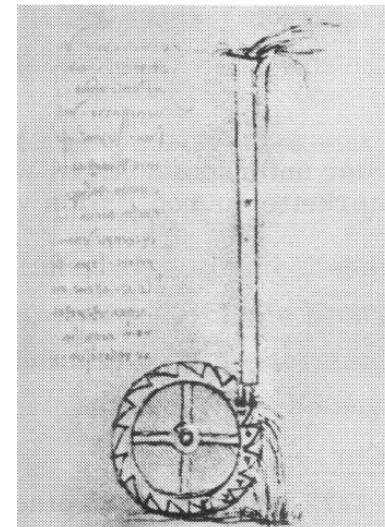
800 bis 900 n. Chr.

weitere Verbreitung der unterschlächtigen Wasserräder in Europa (Antrieb von Mühlen)



um 1409

Leonardo da Vinci, Skizzen über Wasserkraftmaschinen

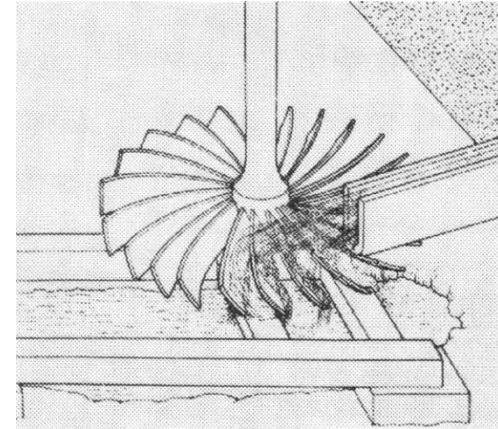


[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

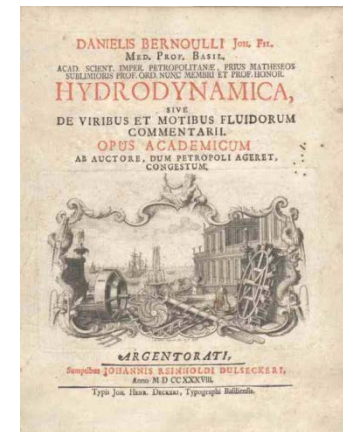
## Aufgabe: mechanische Energie aus der Wasserkraft gewinnen

16. Jahrh.

Wasserrad mit tangentialer  
Beaufschlagung



1738 Nachweis der Reaktionswirkung  
des Wassers durch D. Bernoulli  
in seiner „Hydrodynamica“

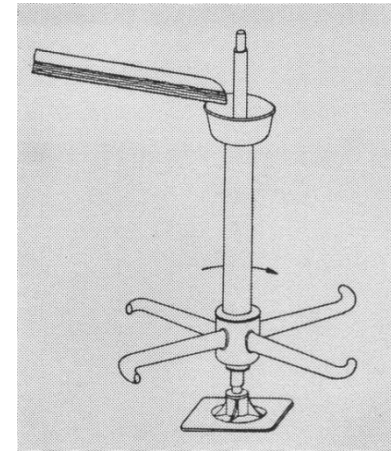


[<http://www.deutsches-museum.de>]

## Aufgabe: mechanische Energie aus der Wasserkraft gewinnen

1750

Wasserrad von A. Segner

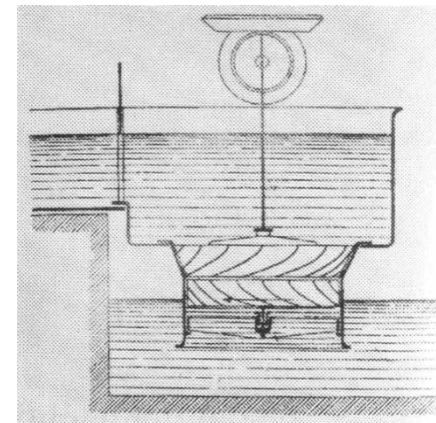


1832

radial beaufschlagte Wasserturbine von Benoit Fourneyron

1837

axiale Reaktionsturbine  
von Carl Henschel und Verbesserung  
durch N. J. Jonval

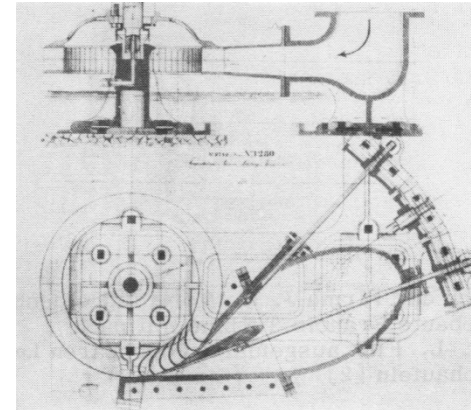


[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Aufgabe: mechanische Energie aus der Wasserkraft gewinnen

1845

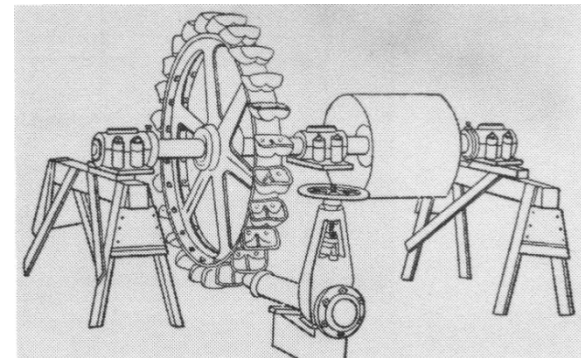
teilbeaufschlagte Tangentialturbine von Escher Wyss



1849 bis 1874 Entwicklung der Francis-Turbine

1880

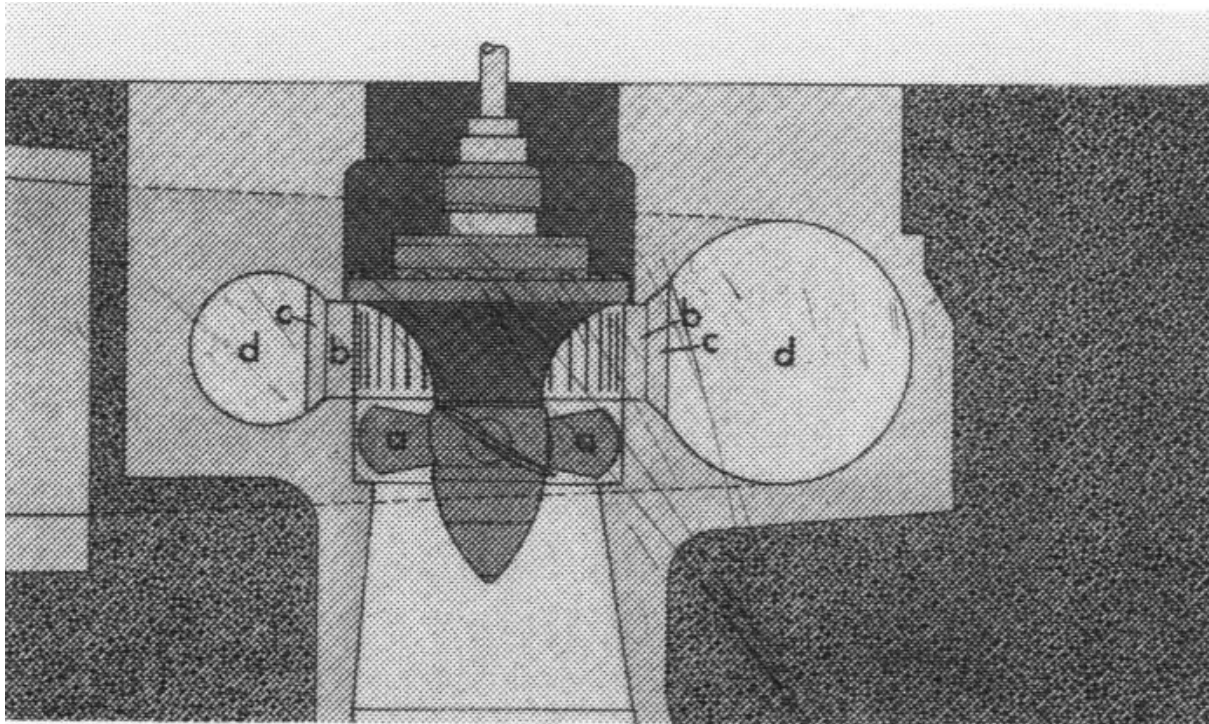
Patent für Freistrahlturbine von L. A. Pelton



[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Aufgabe: mechanische Energie aus der Wasserkraft gewinnen

1913 Patent an V. Kaplan für eine Propellerturbine mit schwenkbaren Schaufelblättern



[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Aufgabe: Windenergie nutzbar machen

um 1750 v. Chr.

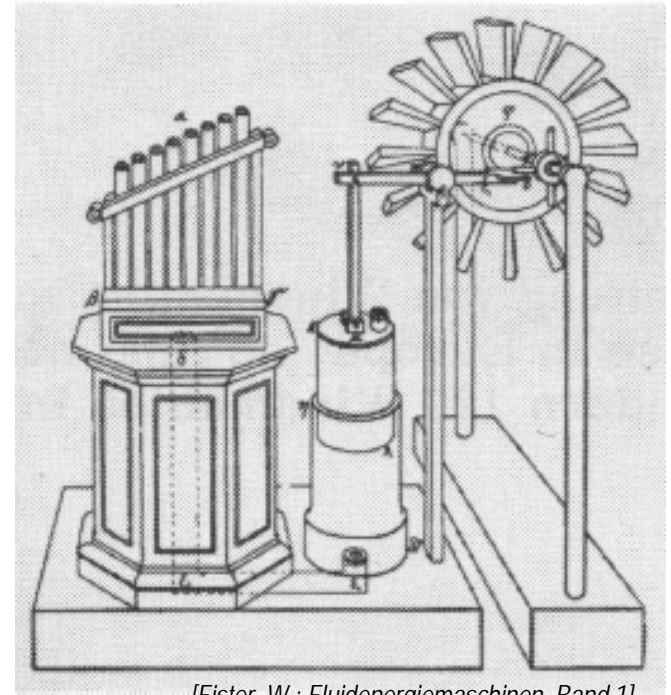
Gesetzbuch des Königs Hammurapi erwähnt Windmühlen in Babylon

1. Jahrh. n. Chr.

Entwurf eines Windrades zum Antrieb einer Kolbenpumpe des Heron von Alexandria

um 600 n. Chr.

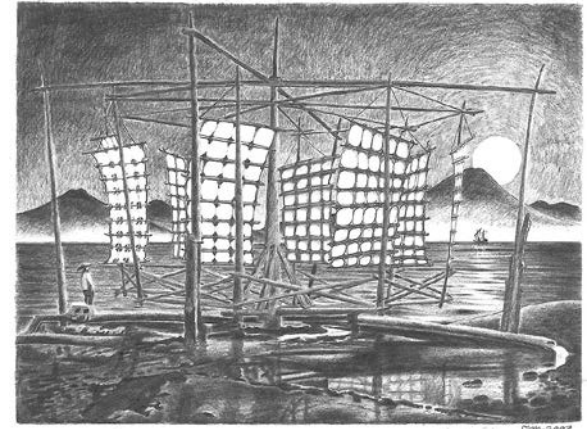
erste Windmühlen größerer Leistungen mit vertikaler Welle in Persien



[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Aufgabe: Windenergie nutzbar machen

chinesisches Windrad

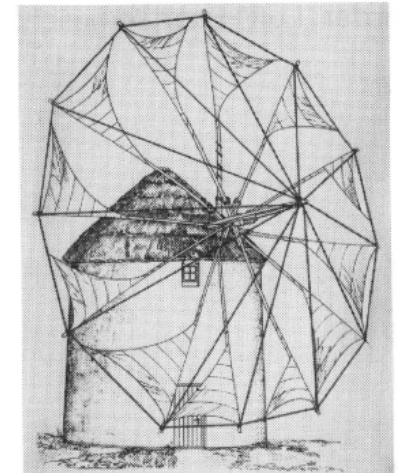


ab 1100 n. Chr.

erste Darstellungen europäischer Windmühlen

ab 1200 n. Chr.

weite Verbreitung von Windmühlen  
mit horizontaler Achse in Europa

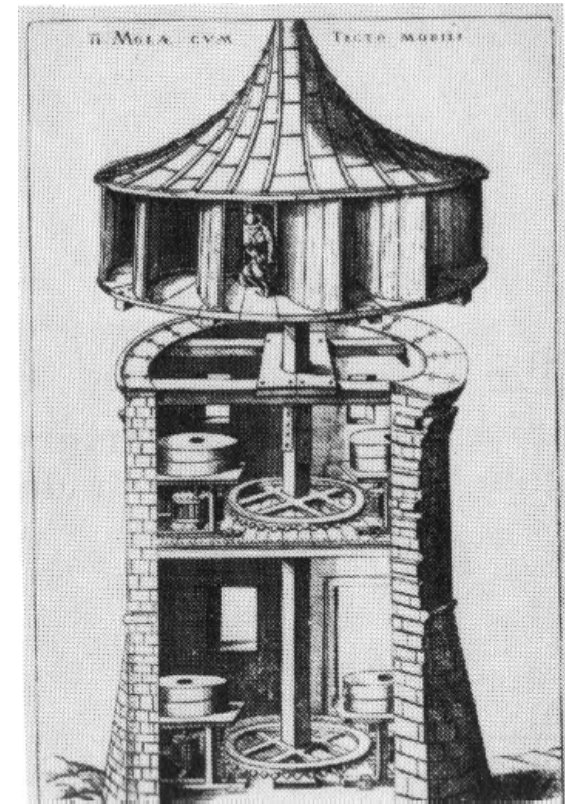


[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Aufgabe: Windenergie nutzbar machen

1615

Entwurf einer Windmühle mit vertikaler Achse von Fausto Veranzio (Venedig)



[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Aufgabe: Windenergie nutzbar machen

1854

Entwicklung eines vielflügligen Windrades (Westernmill) durch Daniel Halladay (30 bis ca. 150 Rotorblätter, bis zu 1 kW Leistung, einfache und robuste Bauart, Langsamläufer)



*[Wikipedia]*

um 1900

Entwicklung des Konzeptes einer Windkraftanlage mit wenigen aerodynamisch geformten Flügelprofilen (Schnellläufer) durch den Dänen Poul la Cour

## Aufgabe: Transport/Verdichtung von Gasen (Luft)

1550

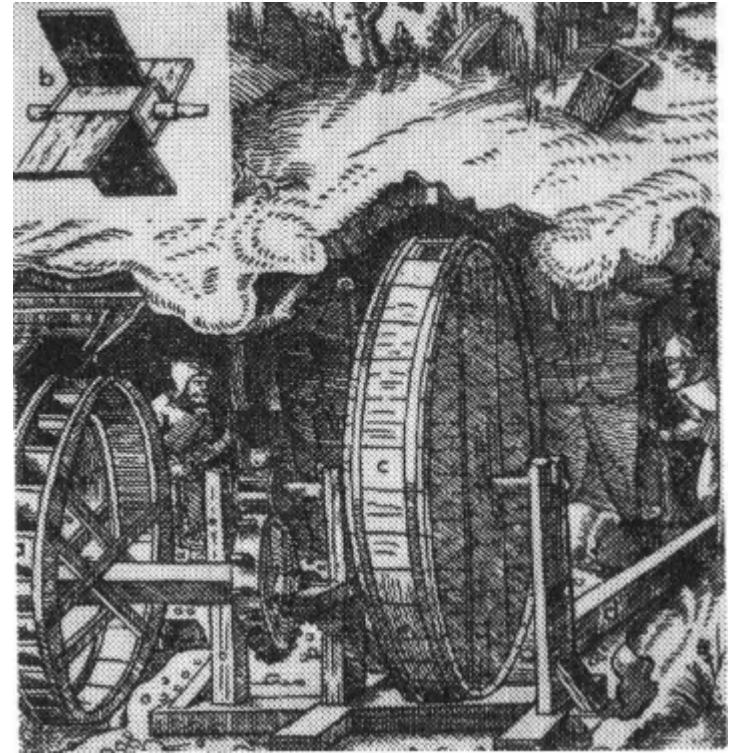
Beschreibung eines Gebläses durch  
G. Agricola

1609

Verwendung eines Zentrifugalventilators  
zur Getreidereinigung in China

um 1690

als Ventilator benutzte Zentrifugalpumpe des Denis Papin



[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Aufgabe: Transport/Verdichtung von Gasen (Luft)

1728 – 1741

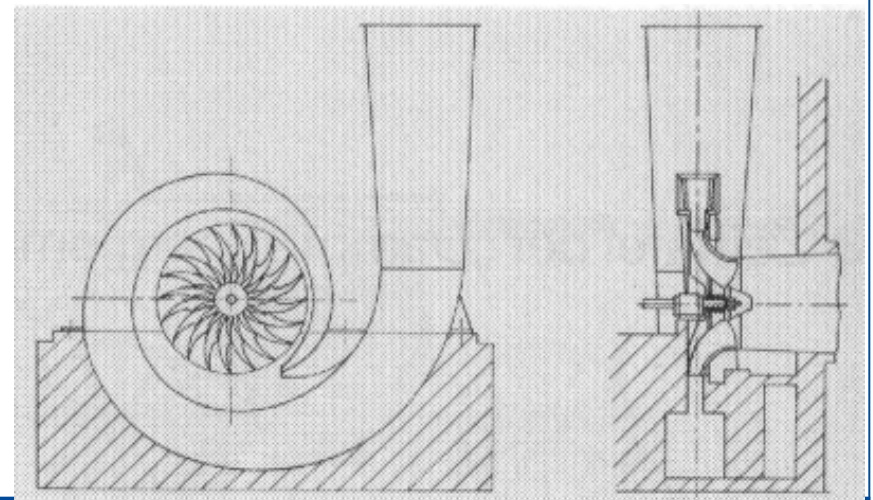
Verwendung von Zentrifugalventilatoren für Feuerungen und zur Belüftung öffentlicher Gebäude

um 1850

Zentrifugalverdichter einer Rohrpostanlage in London

1899

Bau des ersten einstufigen Radialverdichters durch Rateau (Frankreich)



[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## **Aufgabe: Transport/Verdichtung von Gasen (Luft)**

um 1900

Entwicklung von Axialverdichtern durch den Dampfturbinenkonstrukteur A. Parsons

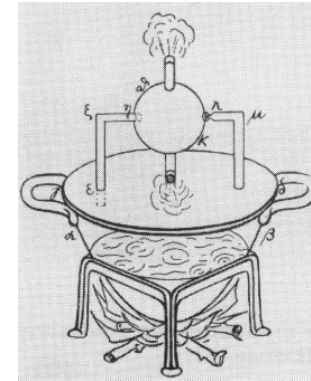
1905

Bau des ersten mehrstufigen Radialverdichters durch Rateau

## Aufgabe: Dampfenergie in mechanische Energie wandeln

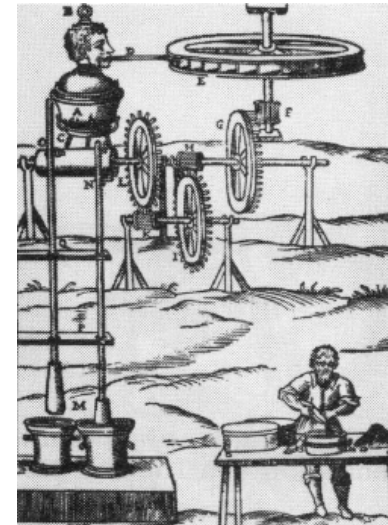
1. Jahrh. n. Chr.

Äolipile (Drehkugel) des Heron von Alexandria



1629

Entwurf des „Püsterich“, einem Vorläufer der Gleichdruckturbinen von Giovanni Branca

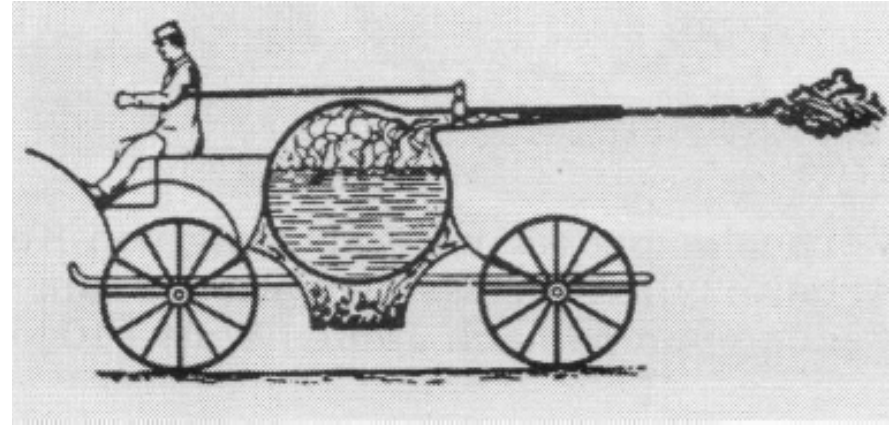


[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Aufgabe: Dampfenergie in mechanische Energie wandeln

1680

Vorschlag eines mit Wasserdampf betriebenen Wagens nach dem Rückstoßprinzip von I. Newton



(1790 bis 1781 Entwicklung Kolbendampfmaschine) [Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

1784

Patent auf eine Reaktionsdampfturbine für James Watt

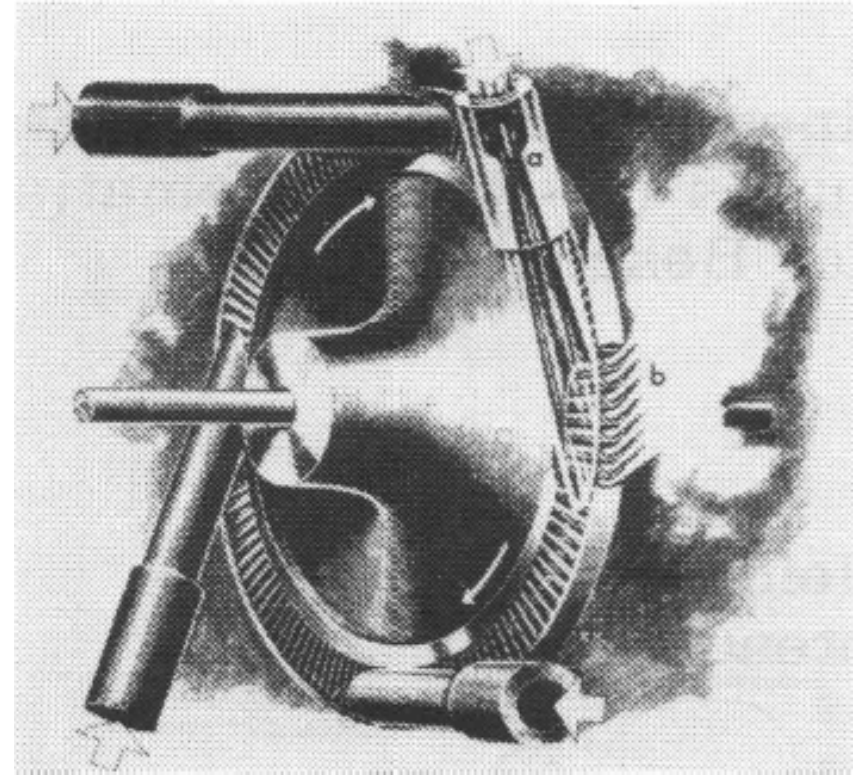
um 1840

Dampfturbine mit 64 PS Leistung von Christian Schiele

## Aufgabe: Dampfenergie in mechanische Energie wandeln

1883

Karl Gustav Laval (Schweden)  
baut die erste einstufige  
Gleichdruck-Dampfturbine (A-Rad)



1884

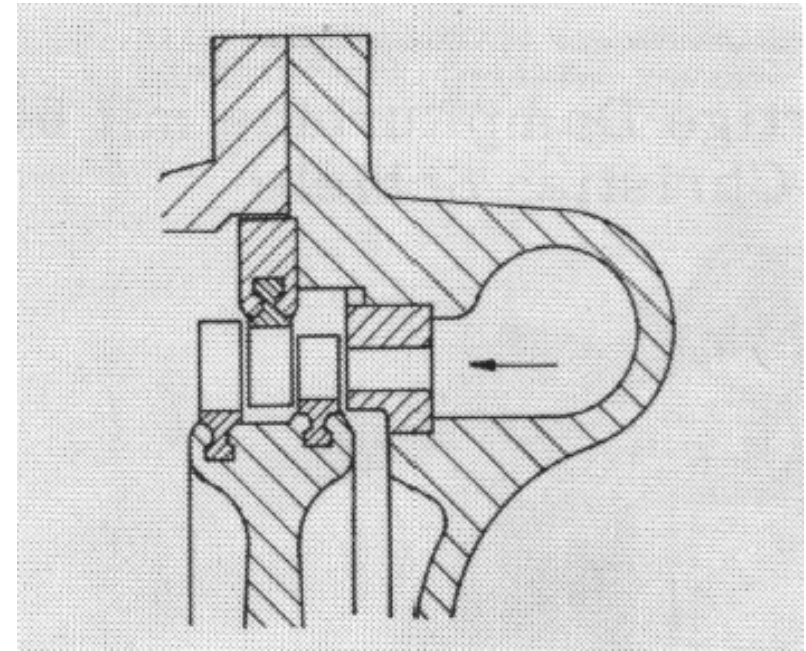
Patente für eine axiale Überdruckturbine (Reaktionsturbine) an  
Parsons

*[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]*

## Aufgabe: Dampfenergie in mechanische Energie wandeln

1896

Bau von Turbinen mit Geschwindigkeitsstufen nach Curtis (C-Rad)



1897

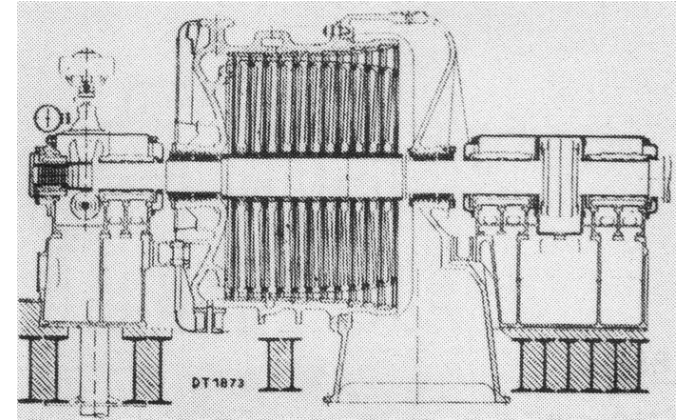
vieltufige Gleichdruckturbine von Rateau

[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

## Aufgabe: Dampfenergie in mechanische Energie wandeln

1903

axialdurchströmte Gleichdruckturbine von Zölly (Schweiz)



heute

moderne

Niederdruck-Dampfturbine



[Fister, W.: Fluidenergiemaschinen, Band 1]

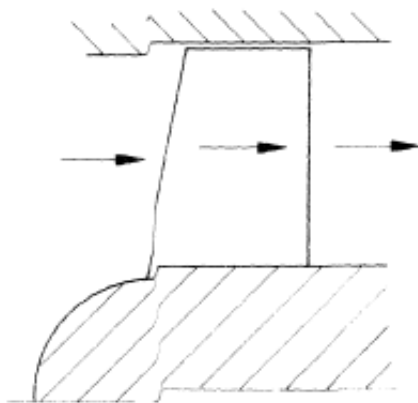
# Aufbau und Wirkungsweise

## Hauptkomponenten:

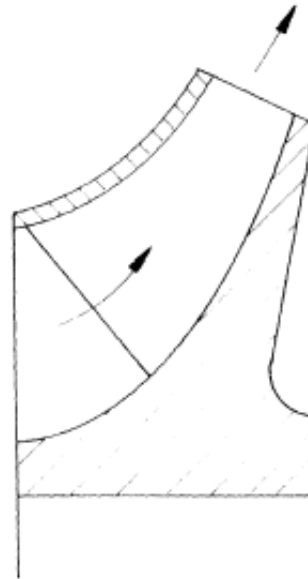
- rotierende Laufräder mit Laufschaufeln zur Energieübertragung zwischen Fluid und mechanischem System
- feststehende Leiträder zur Wandlung zwischen kinetischer Energie des Fluids und Druckenergie
- Sammel- und Rückführeinrichtungen (Spiralen, Rückführkanäle)
- Gehäuse und Dichtungen
- Wellen und Lager
- Regeleinrichtungen

## Bauformen der Laufräder:

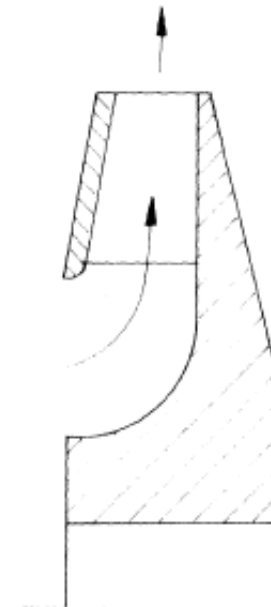
axial



diagonal



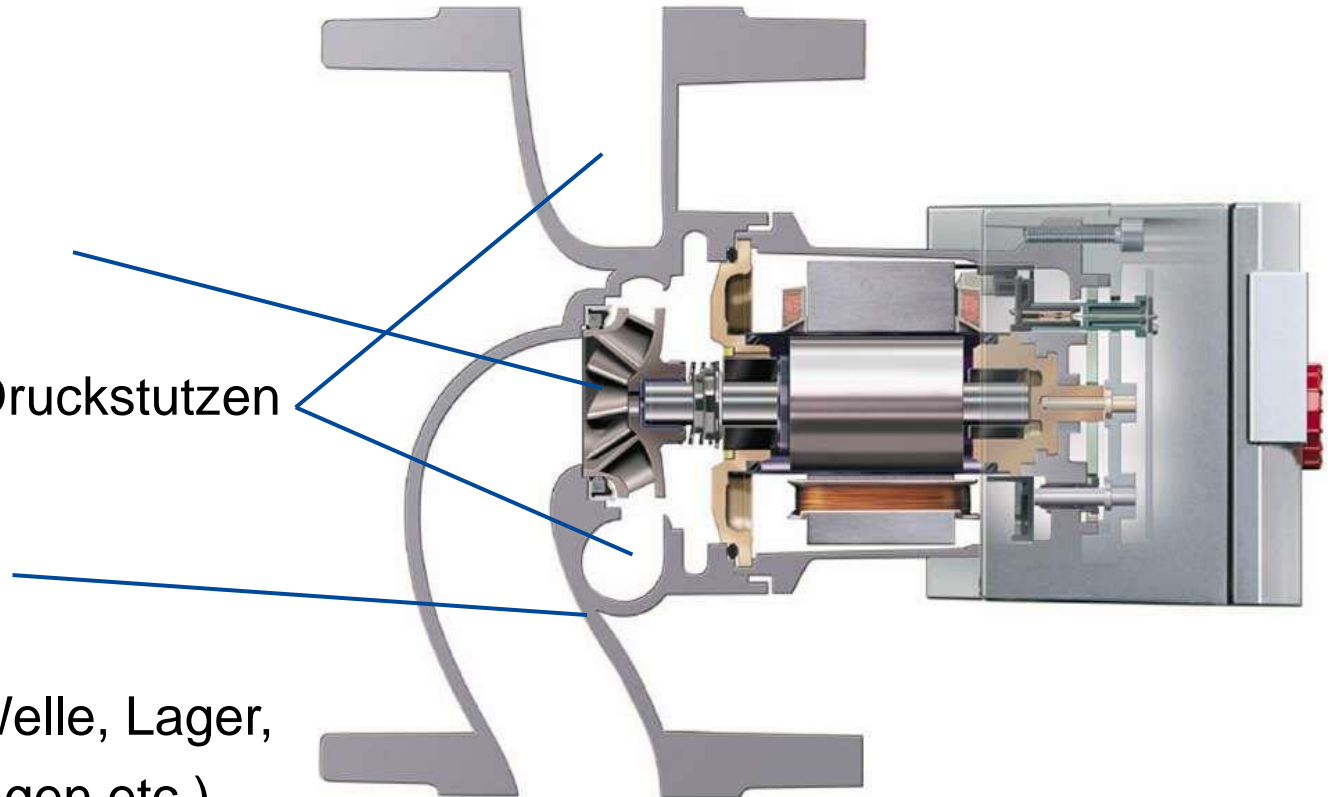
radial



# Aufbau und Wirkungsweise

## Beispiel Pumpe mit Radiallaufrad

- Laufrad
- Spirale mit Druckstutzen
- Gehäuse
- Mechanik (Welle, Lager, Dichtungen etc.)



# Aufbau und Wirkungsweise

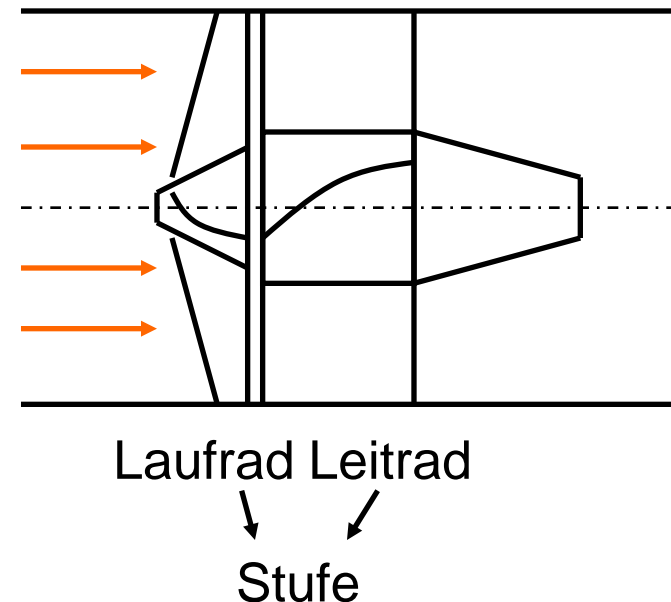
## Wirkungsweise:

### Lauftrad:

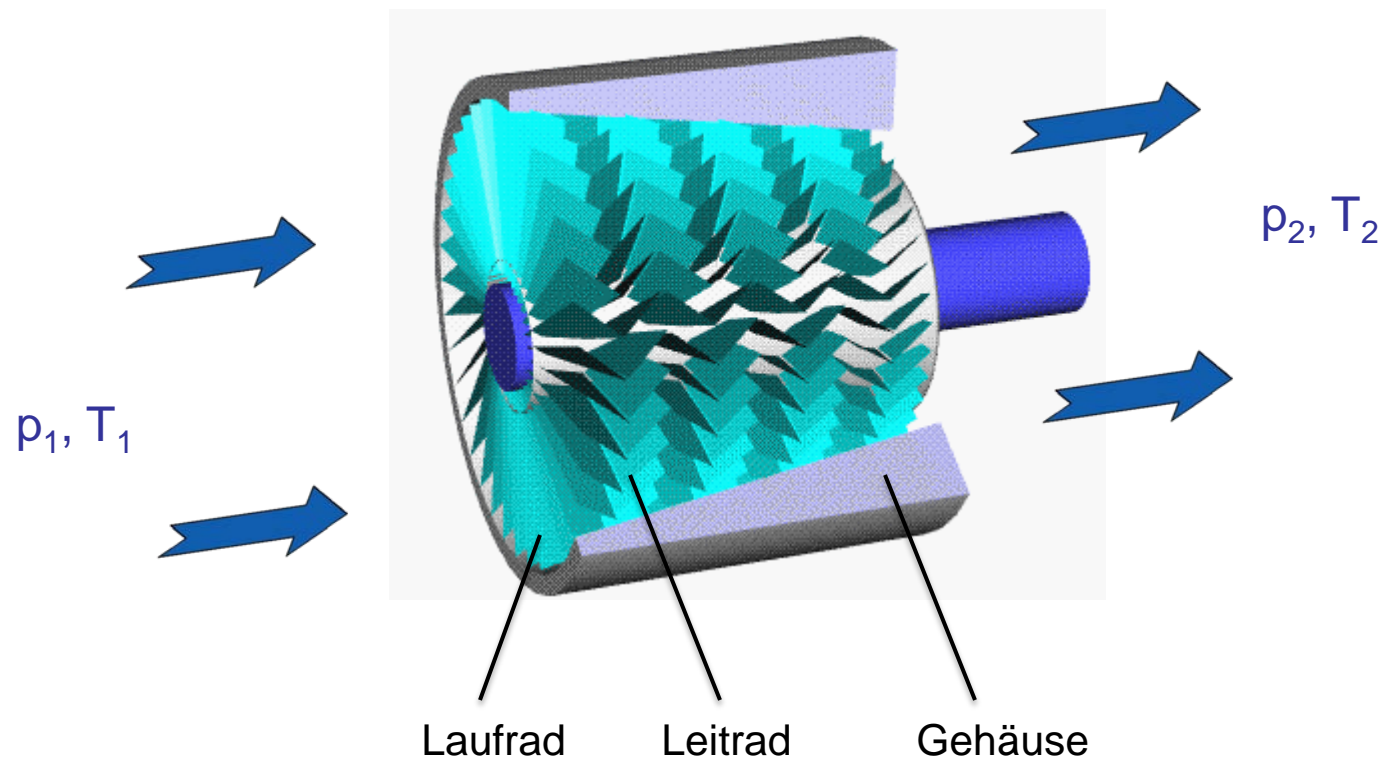
- Energieübertragung durch **Änderung des Drehimpulses (Dralländerung)** mit Hilfe beschaufelter Rotoren

### Leitrad:

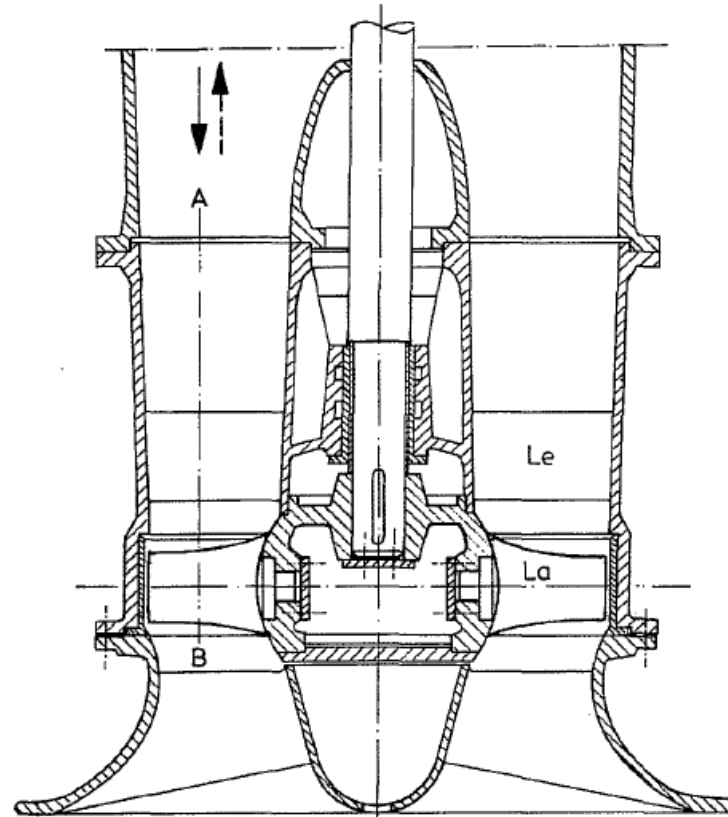
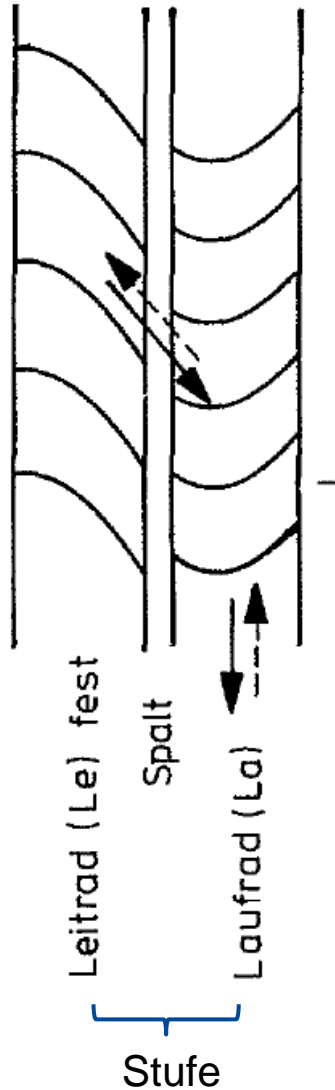
- Dralländerung bzw. Änderung der Strömungsrichtung ohne Arbeitsübertragung (aber **Energieumwandlung**  $E_{\text{kin}} \Leftrightarrow E_{\text{pot}}$ )



## Axialverdichter:



# Aufbau und Wirkungsweise



- Turbine
- - - → Pumpe, Verdichter

links: abgewickelter (koaxialer) Zylinderschnitt durch eine Axialmaschine

rechts: Meridianschnitt einer Axialmaschine

Tafel 3