

Grundlagen der Strömungsmaschinen und Windturbinen

9. Strömungswandler

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. Pumpenbauarten, Sonderbauarten
9. **Strömungswandler**
10. Voith-Schneider-Propeller, Gezeitenturbine, Wells-Turbine
11. Windturbinen – Einführung, Aufbau
12. Windturbinen – Entwurf
13. Dampfturbinen
14. Wasserturbinen

9.1 Einführung

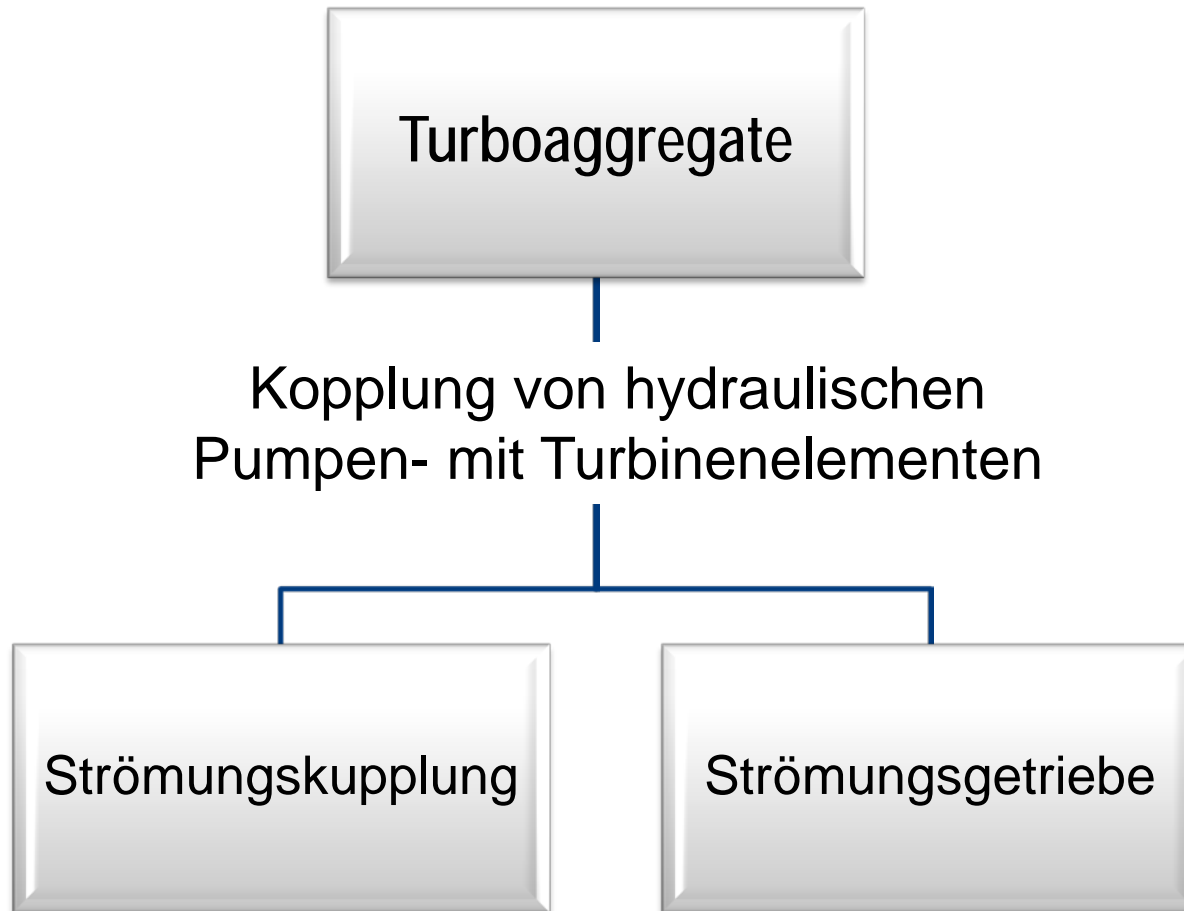
Kombinationen von Arbeits- und Kraftmaschinen bilden komplette Aggregate.

Aus dem Bereich der Strömungsmaschinen zählen hierzu:

- Gasturbine
- Abgasturbolader
- **Strömungsgetriebe**
- **Strömungskupplung**

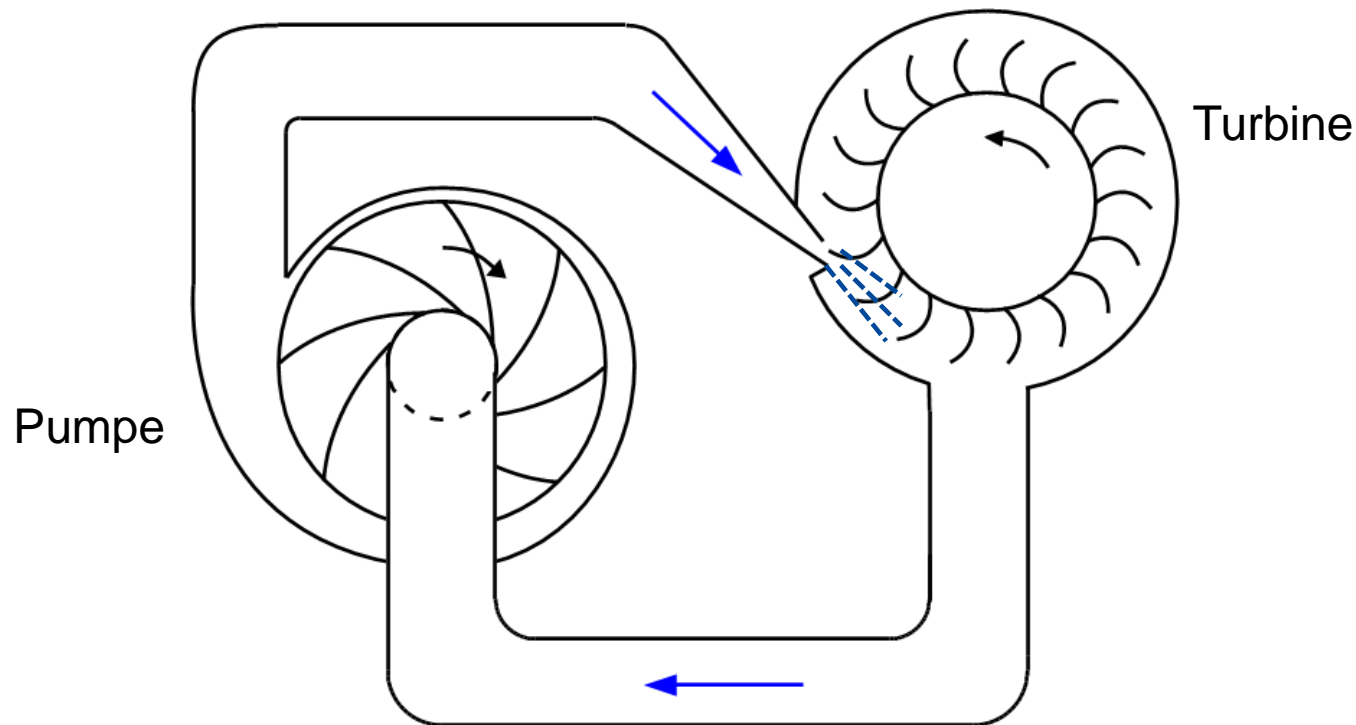


Turboaggregate



Funktionsweise von Turboaggregaten

Mechanische Energie wird über eine Pumpe in Strömungsenergie gewandelt und anschließend in der Turbine wieder in mechanische Energie rücktransformiert (Kreisprozess).



schematische Darstellung der hydrodynamischen Leistungsübertragung

Einordnung der Fluidantriebe nach Prinzip der Wandlung

- hydrostatisches Prinzip
- hydrodynamisches Prinzip

Einordnung der Fluidantriebe nach Prinzip der Wandlung

hydrostatisches Prinzip

- Mechanische Leistung des Antriebes wird mit einer Pumpe (Kolbenpumpe) in hydraulische Energie der Flüssigkeit gewandelt und über eine Druckleitung auf einen oder mehrere hydraulische Motoren (Kolbenmotoren) übertragen.
- Fluidenergie in Form von potenzieller Energie (Druck von 80 bis 400 bar), Strömungsgeschwindigkeiten nur sehr gering
- Pumpe und Motor arbeiten nach dem Verdrängungsprinzip, sind keine Strömungsmaschinen
- Strömungsverluste gering → großer Abstand zwischen Pumpe und Motor möglich

hydrostatisches Prinzip

T1

- Anwendungen:
 - hydraulische Fahrtriebe für Baumaschinen (mobile Baukräne, Hafenkräne, Bergbau)



Liebherr Hafenmobilkran LHM 400

hydrodynamisches Prinzip

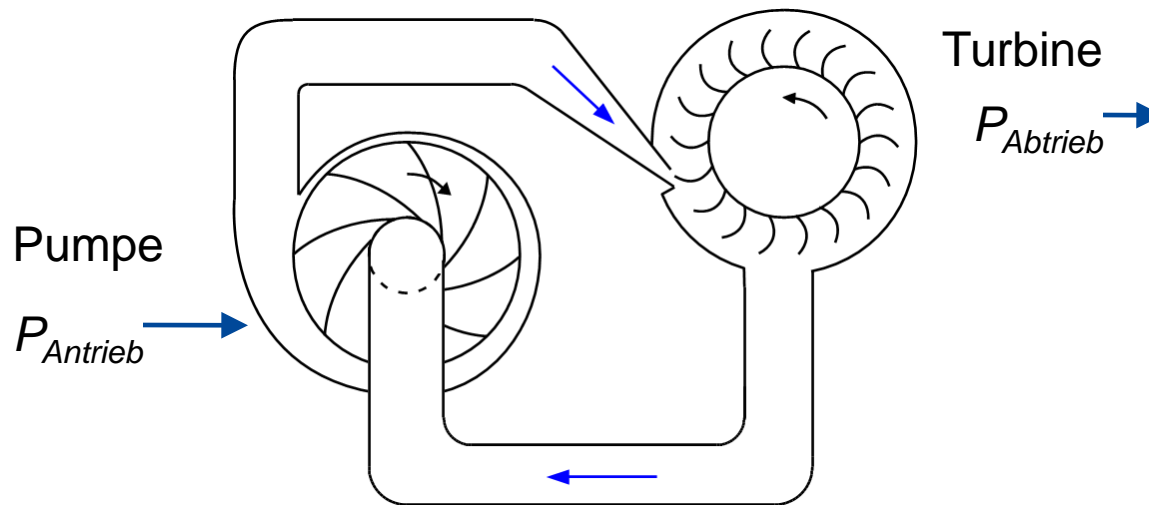
- Mechanische Leistung des Antriebes wird von einem Pumpenrad in Strömungsenergie (Kreiselpumpe) der Flüssigkeit gewandelt, welche vom Turbinenrad wieder in mechanische Energie rücktransformiert wird.
- Energieübertragung durch kinetische Energie (Änderung der Fluidgeschwindigkeit) bei geringen Drücken
- Pumpe und Turbine arbeiten nach dem Turboprinzip.
- Strömungsverluste vorherrschend → großer Abstand zwischen den Pumpen und Turbinenlaufrädern führt zu deutlicher Verringerung des Wirkungsgrades

hydrodynamisches Prinzip

- Anwendungen:
 - als Strömungskupplung in Arbeitsmaschinen (Brecher, Mischer, Förderer, Gebläse, Schiffsantriebe, Traktoren)
 - als Strömungskupplung und –getriebe in Automatikgetrieben von Nutzfahrzeugen und Pkw
 - Kraftübertragung in Dieselloks mit hoher Antriebsleistung
 - als Bremse (Retarder) in Bussen

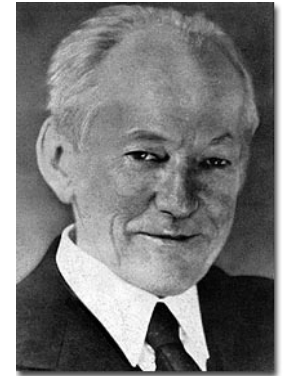
- um 1900
- Entwicklung erster Ideen zur Kraftübertragung mittels hydraulischer Energien nach dem hydrodynamischen Prinzip
 - praktische Umsetzung scheitert an zu geringen Wirkungsgraden

$$\eta_{\text{Gesamt}} = \eta_{\text{Pumpe}} \cdot \eta_{\text{Turbine}} \cdot \eta_{\text{Rohr}} < 70\%$$

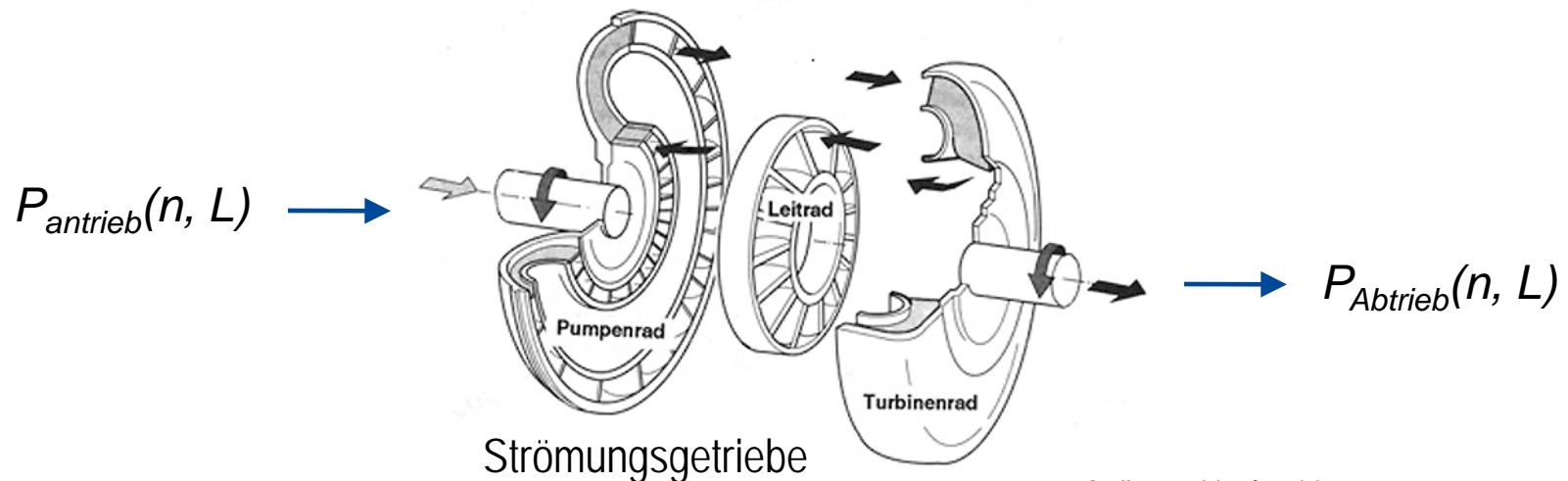


schematische Darstellung der hydrodynamischen Leistungsübertragung

- 1905 - Der deutsche Ingenieur Hermann Föttinger meldet ein Patent für ein neues Konzept der hydrodynamischen Drehmomentwandlung für Schiffsantriebe mittels Dampfturbinen an.
- Erhöhung des Wirkungsgrades durch Anordnung von Pumpe, Turbine und Leitrad direkt hintereinander in einem gemeinsamen Gehäuse ($\eta_{Gesamt} > 80 \%$, heute $> 90 \%$) → verlustbehaftete Strömungswege in Rohrleitung und Pumpenleitvorrichtung entfallen



Hermann Föttinger
Quelle: TU Berlin



Quelle: www.lehrerfreund.de

9.2 Strömungskupplung

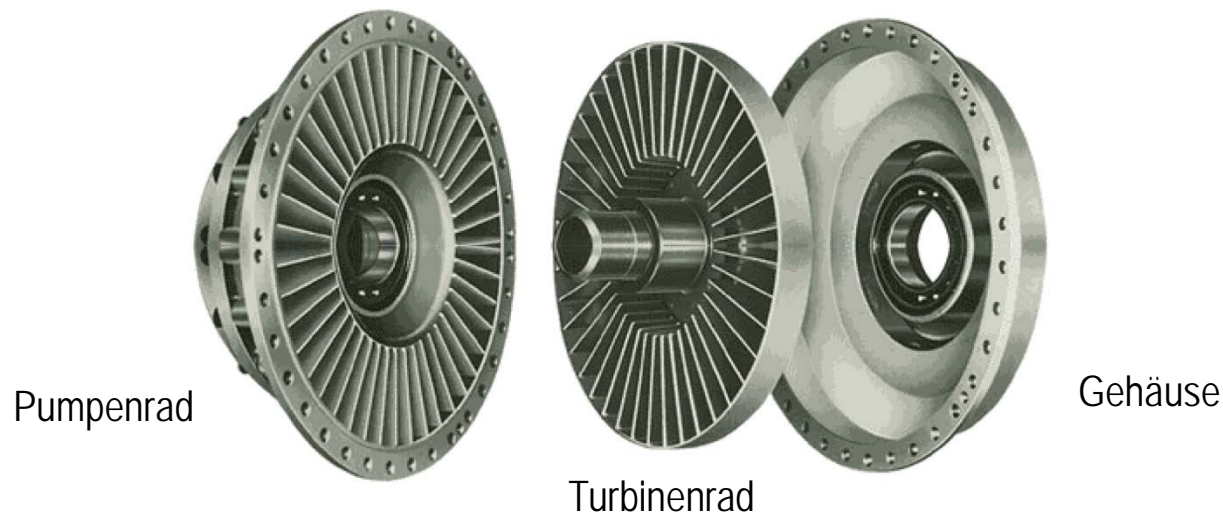
Internet-Link:

- <http://www.youtube.com/watch?v=G3suoyRLHUw&NR=1&feature=endscreen>
- <http://www.youtube.com/watch?v=97EKbN1ZXrs>

Strömungskupplung

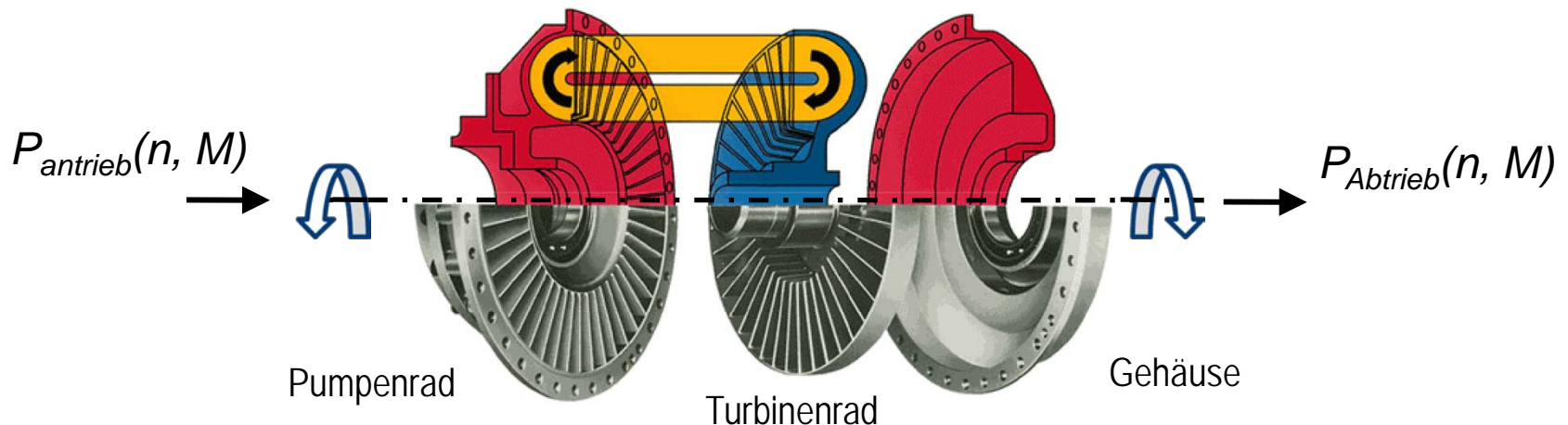
Aufbau

- zwei eng beieinander angeordnete halbtorusförmige Schalen
- im Allgemeinen gerade, rein radial verlaufende ebene Schaufeln
- Antrieb über Pumpenrad (Primärrad)
- Abtrieb über Turbine (Sekundärrad)
- Achsschubausgleich über mitlaufendes Gehäuse, mit Pumpenrad verschraubt
- Arbeitsflüssigkeit meist temperaturbeständiges, nichtsäumendes Öl



Arbeitsweise

- Beförderung des Arbeitsfluids im Pumpenkanal radial nach außen durch die Fliehkraftwirkung aufgrund des umlaufenden Pumpenrades
- Umlenkung, Druckerhöhung und Beschleunigung des Arbeitsfluides bis zum Pumpenradaustritt (Umwandlung mechanischer Antriebsenergie in kinetische Energie des Fluid)
- Erneute Umlenkung, Verzögerung und Druckabfall des Fluids nach Eintritt in das Turbinenrad → Änderung des Impulsstromes = Kraftwirkung auf Schaufel
- tangentialer Anteil der Kraft bewirkt Drehmoment auf Turbinenschaufel



Strömungskupplung

Energieübertragung

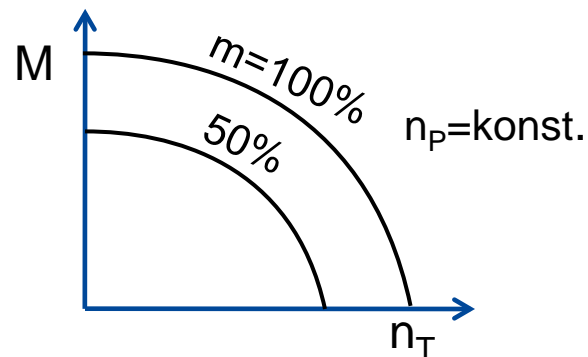
- Nach Gleichgewichtssatz der Mechanik (Aktion=Reaktion) gilt:

$$M_{Pumpe} = M_{Turbine}$$

- Energieübertragung im Laufrad durch Dralländerung (Eulergleichung):

$$M = M_P = M_T = \Delta \dot{L} = \dot{m} \cdot \Delta(r \cdot c_u)$$

- daraus folgt:
 - Verstellung des Drehmomentes über Änderung der umlaufenden Fluidmenge (Füllungsgrad) möglich



Strömungskupplung

$$M = M_P = M_T = \Delta \dot{L} = \dot{m} \cdot \Delta(r \cdot c_u)$$

- Um ein Drehmoment zu übertragen, ist ein Drehzahlunterschied zwischen Primär und Sekundärrad notwendig. Die Strömungskupplung ist somit ein Drehmomentübertrager und beim Anfahren ein Drehzahlwandler.
 - $n_P > n_T \rightarrow$ Nutzmoment, M_{\max} wenn $n_T = 0$ (Anfahrmoment)
 - $n_P < n_T \rightarrow$ Bremsmoment
 - $n_P = n_T \rightarrow$ kein Moment, Arbeitsfluid strömt nicht mehr

\rightarrow Leistungsdifferenz zwischen Primär- und Sekundärrad=Verluste

$$\Delta P = M \cdot \Delta \omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot \Delta n$$

Strömungskupplung

- die Drehzahldifferenz wird durch den Schlupf s dargestellt:

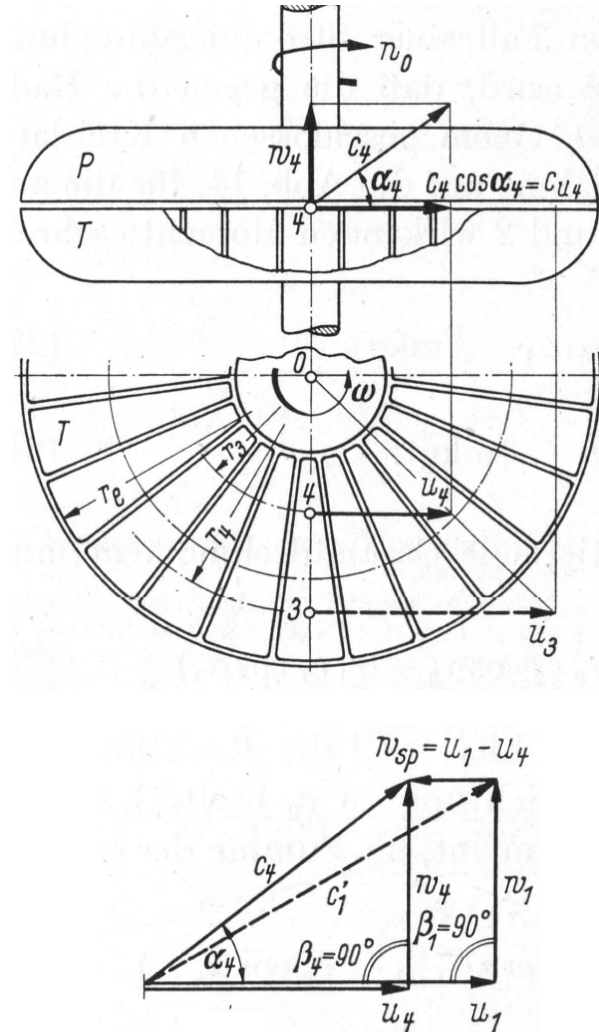
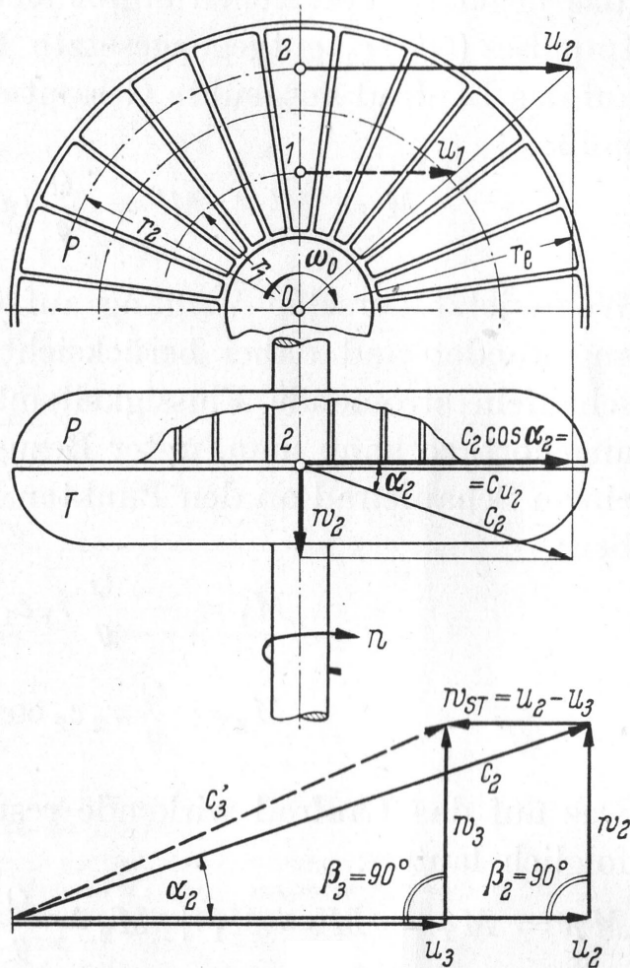
$$s = \frac{n_P - n_T}{n_P}$$

- Einfluss von Drehzahl und Abmessungen auf das Drehmoment:

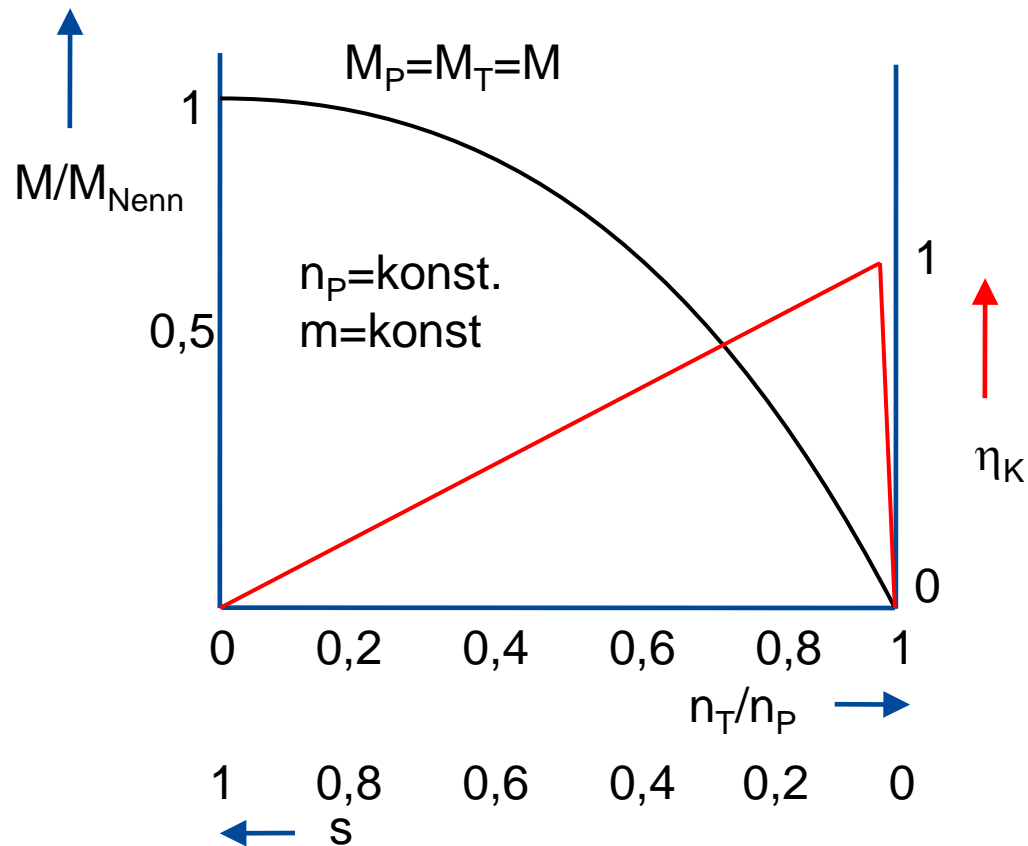
$$M = \lambda \cdot \rho \cdot \omega_P^2 \cdot D^5$$

mit: Leistungszahl λ
Kreisfrequenz der Pumpe ω_P
Kupplungsdurchmesser D

Geschwindigkeitsdreiecke



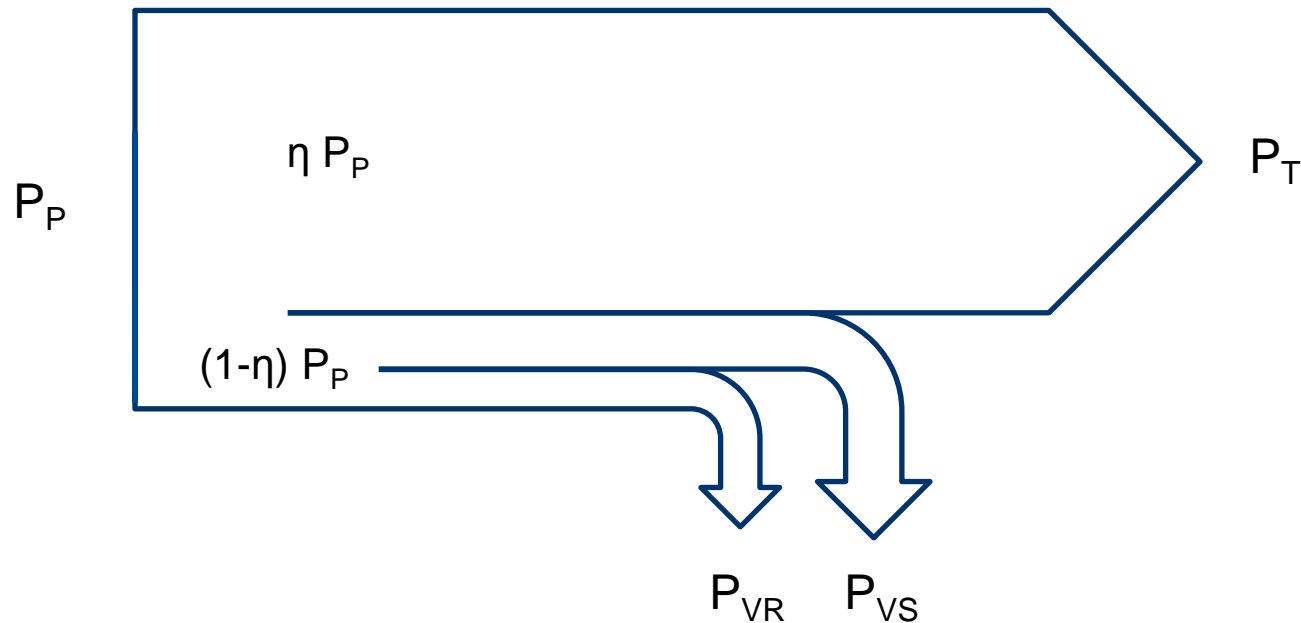
Kennlinien



Strömungsverluste

- Flüssigkeitsreibung P_{VR}
- Stoßverluste P_{VS}

⇒ Wärme



Wirkungsgrad:

$$\eta_{Ku} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_T}{P_P} = \frac{M_T \cdot \omega_T}{M_P \cdot \omega_P} = \frac{n_T}{n_P} = 1 - s$$

Strömungskupplung

Vorteile gegenüber Reibkupplung

- verbessertes (weiches) Anfahren
- schwingungsdämpfend
- stoßdämpfend
- kein Verschleiß (kein Rutschen der Kupplung notwendig)
- kurzzeitigen Anhalten am Hang möglich
- Schutz von Anlagen vor Überlast und Blockierung
- Leerlaufgeräusche im Getriebe reduziert
- kein Motorabwürgen

Nachteile

- Energieverlust durch Schlupf (2-3%)
- geringerer Wirkungsgrad als mechanische Kupplungen
- Verlustwärme erfordert Kühlung, Überhitzungsgefahr
- Regelbereich begrenzt
- Abmessungen verhältnismäßig groß

Ausführungen / Anwendungen

- Im Nennbetrieb werden Wirkungsgrade von 95...98% erreicht. Mechanische Kupplungen erreichen nahezu 100%.
 - Verwendung der Strömungskupplung als Anfahrkupplung in Verbindung mit einer mechanischen Kupplung (Überbrückungskupplung). Wird Nenndrehzahl erreicht, wird mechanisch durchgekuppelt und die Strömungskupplung zur Senkung der Widerstände entleert.
- hauptsächliche Anwendungsgebiete:
 - Lastfreier bzw. teilentlasteter Anlauf von Antriebsmaschinen
 - Anfahren schwerer und schwerster Maschinen im Bergbau
 - Fördertechnik
 - Maschinenbau
 - Fahrzeugwesen
 - Schiffbau
 - Chemie

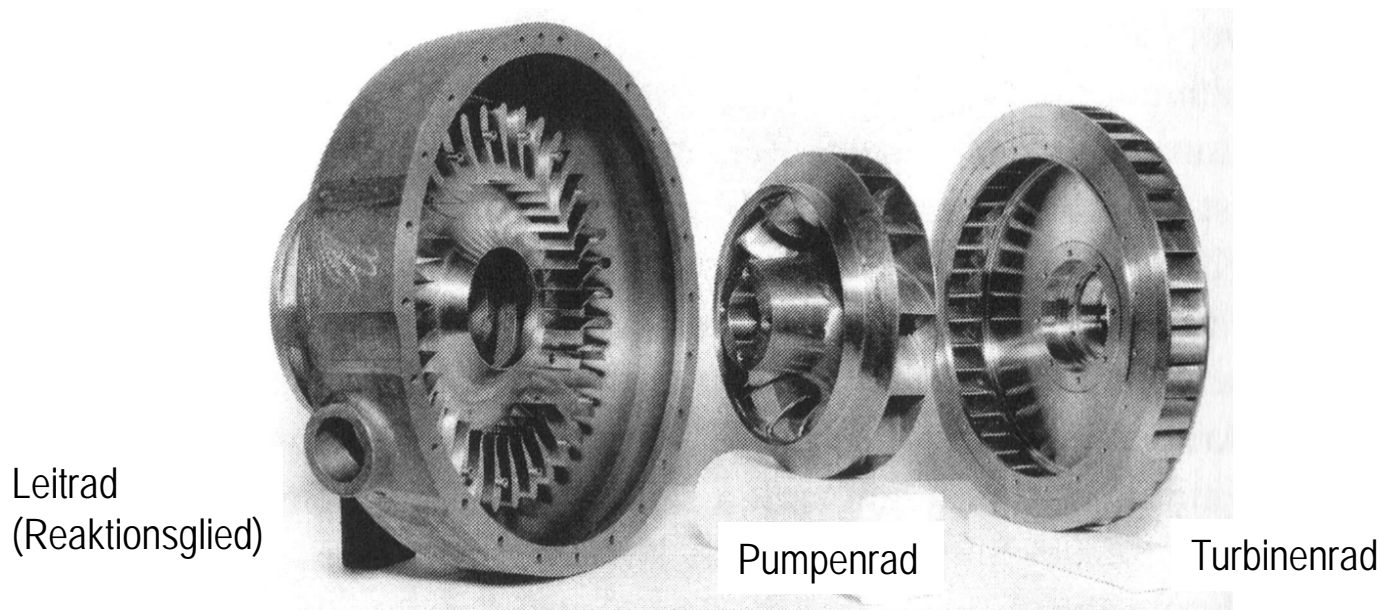
9.3 Strömungsgetriebe

Abgrenzung zur Strömungskupplung

- Strömungskupplung ist Drehzahl-Wandler (bei Anfahrvorgang) – Strömungsgetriebe ist Drehmoment-Wandler
- für Strömungskupplung gilt: $M_P = M_T$; P und n variabel
- für Strömungsgetriebe gilt: $P_P \approx P_T$; M und n variabel
- Strömungsgetriebe passen das Abtriebsmoment und die Abtriebsdrehzahl selbsttätig an die Anforderungen an, bei gleichbleibenden Antriebswerten ($M_{\text{Antrieb}}, n_{\text{Antrieb}}$)

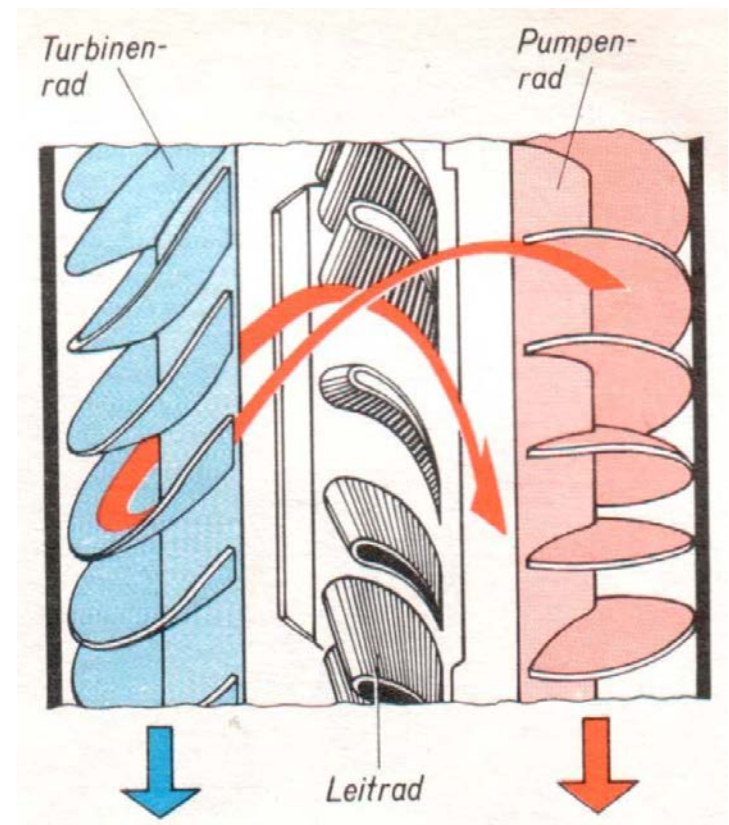
Aufbau

- umlaufendes Pumpenrad und Turbinenrad , im Gegensatz zur Strömungskupplung mit gekrümmten Schaufeln
- zusätzlich mindestens ein feststehendes Leitrad (Reaktionsglied),
- Leitrad mit starren oder verstellbaren Schaufeln, fest mit Gehäuse verbunden



Arbeitsweise

- Änderung des Drehmomentes im Getriebe erfordert Umlenkung (Dralländerung) des Arbeitsfluides durch ein zusätzliches Schaufelrad=Leitrad bzw. Reaktionsglied
- Pumpen- und Turbinenrad sind umlaufend
- Leitrad ist feststehend und nimmt Moment M_R auf (Stützwirkung)



Strömungsgetriebe

Nach Gleichgewicht der Mechanik ist Vektorsumme aller Momente gleich Null :

$$\Sigma \vec{M} = 0 \quad \rightarrow \quad \vec{M}_P + \vec{M}_T + \vec{M}_R = 0$$

daraus folgt für die Beträge der Momente:

$$|\vec{M}| = M$$

$$M_T = M_P - M_R$$

- wenn Reaktionsmoment und Pumpenmoment gleichgerichtet sind, ist M_R negativ einzusetzen \rightarrow Abtriebsmomenterhöhung
- wenn Reaktionsmoment entgegen dem Pumpenmoment gerichtet ist, ist M_R positiv einzusetzen \rightarrow Abtriebsmomentverkleinerung
- für $M_R > M_P \rightarrow$ Richtungsumkehr \rightarrow Bremswirkung

mit

$$P_P = P_T = konst$$

(Verluste vernachlässigt)

und

$$P = \omega \cdot M$$

folgt für die Beziehung von Drehzahl und Moment

$$n_P \cdot M_P = n_T \cdot M_T \rightarrow \frac{M_P}{M_T} = \frac{n_T}{n_P}$$

Kenngrößen

Drehzahlverhältnis:
$$\nu = \frac{n_T}{n_P}$$

Leistungszahl:
$$\lambda = \frac{M_P}{\rho D^5 \omega_P^2}$$

Wandlung:
$$\mu = \frac{M_T}{M_P}$$

Wirkungsgrad:
$$\eta = \frac{P_T}{P_P} = \frac{M_T}{M_P} \cdot \frac{2\pi n_T}{2\pi n_P} = \mu \cdot \nu$$

Drehmoment:
$$M_P = \lambda \cdot \rho \cdot \omega_P^2 \cdot D^5$$

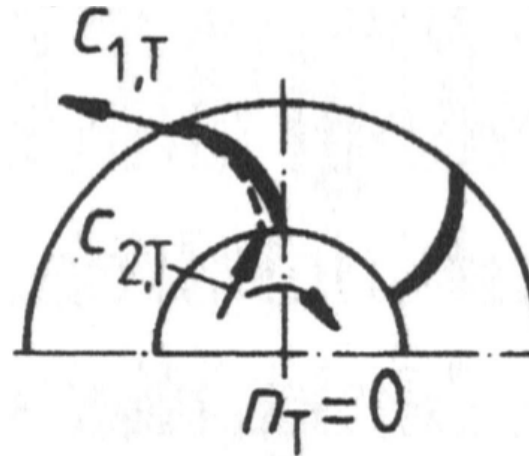
Leistung:
$$P_P = \lambda \cdot \rho \cdot \omega_P^3 \cdot D^5$$

Übertragbares Drehmoment wächst quadratisch und die Leistung kubisch mit der Drehzahl.

- Betriebsverhalten vorteilhaft für Einsatz in Kraftfahrzeugen
 - bei Leerlaufdrehzahl ist Moment zu klein, um Fahrzeug in Bewegung zu setzen → beim Anlassen und im Leerlauf keine Trennkupplung notwendig
 - bei Beschleunigung erhöht sich die Motordrehzahl schnell auf das 5fache → übertragbares Moment steigt um den Faktor 25, die Leistung um den Faktor 125

Strömungsverhältnisse bei verschiedenen Lastzuständen eines Strömungsgetriebes

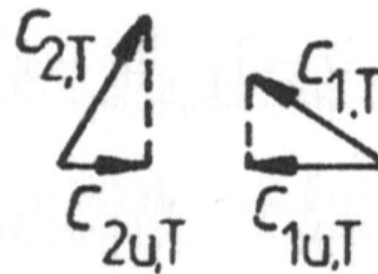
Anfahren



Indizes:
 1...Turbinenausritt
 2...Turbineneintritt
 T...Turbine
 n...Drehzahl
 c...Absolutgeschwindigkeit
 u...Umfangsgeschw.
 w...Relativgeschw.

Ermittlung der Momente:

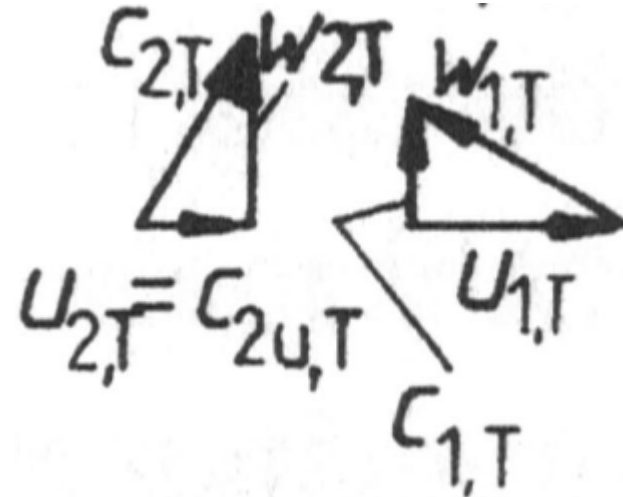
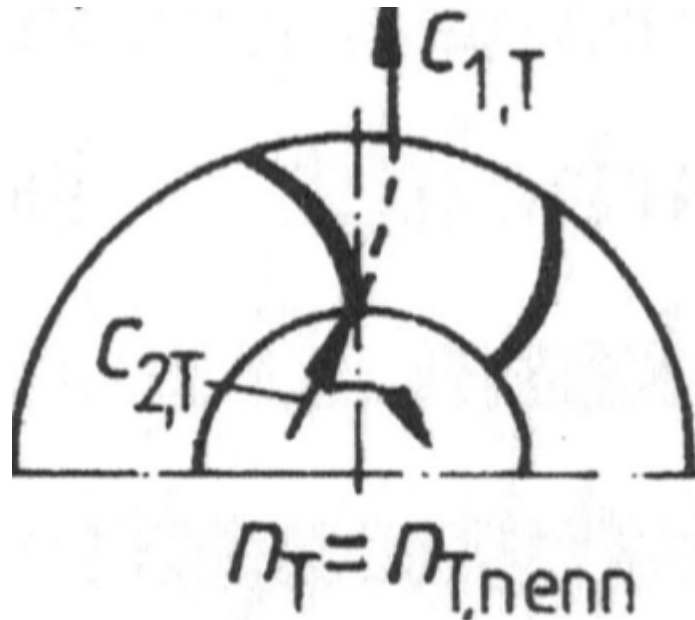
$$M = \dot{m} \cdot \Delta(r \cdot c_u)$$



Quelle: H. Siegloch:
Strömungsmaschinen

- Turbinenrad steht \rightarrow stärkste Umlenkung der Strömung von $c_{2,T}$ auf $c_{1,T}$
- $\Delta c_{u,T} = c_{2u,T} - c_{1u,T} = c_{2u,T} + |c_{1u,T}| \rightarrow$ Abtriebsmoment M_T und Reaktionsmoment M_R erreichen ihren Höchstwert

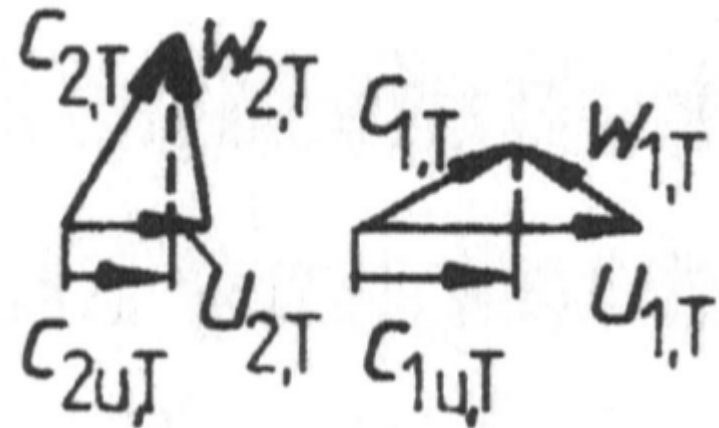
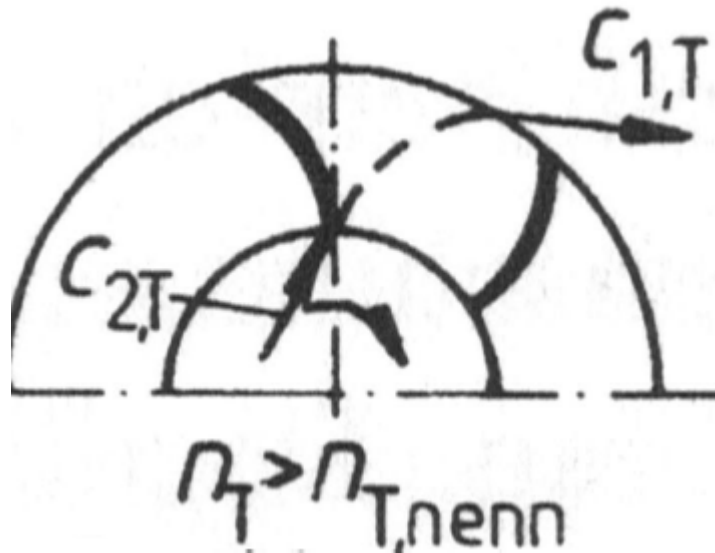
Normalbetrieb



Quelle: H. Sieglösch:
Strömungsmaschinen

- bei Auslegungsdrehzahl radiale und somit drallfreie Abströmung vom Turbinenrad \rightarrow Umlenkung der Strömung von $c_{2,T}$ auf $c_{1,T}$ wird verringert
- $\Delta c_{u,T} = c_{2u,T} \rightarrow$ Abtriebsmoment M_T wird kleiner

Durchgangsbetrieb



Quelle: H. Sieglösch:
Strömungsmaschinen

- Drehzahl der Turbine wird gleich oder größer als die Pumpendrehzahl → Turbine wirkt als Pumpe → Umkehrung der Energieübertagung → Bremswirkung
- $\Delta c_{u,T} = c_{2u,T} - c_{1u,T} < 0$, da $c_{2u,T} < c_{1u,T}$

Strömungsgetriebe

Vorteile gegenüber mechanischen Getrieben

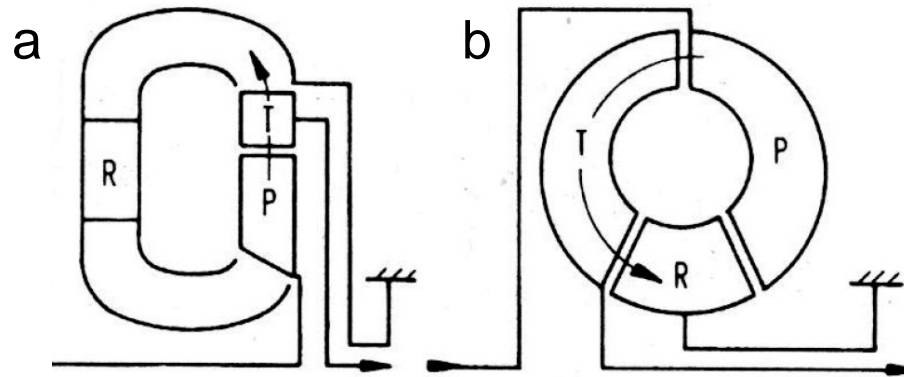
- Antriebsmaschine kann unabhängig vom Abtrieb bei optimaler Drehzahl laufen (z. B. Motor in Kraftfahrzeugen)
- durch hohes Anfahrmoment bei stillstehendem Turbinenrad (5-10fache des Nennmomentes) für Anlagen mit erschwertem Anlauf (große Massen und Kräfte) geeignet
- keine Trennkupplung beim Anlassen und im Leerlauf notwendig
- verbessertes (weiches) Anfahren
- schwingungsdämpfend
- stoßdämpfend
- stufenlose Wandlung
- kein Verschleiß (kein mechanischer Kontakt)

Nachteile

- geringerer Wirkungsgrad (85...94 %)
- Regelbereich / Betriebsbereich begrenzt (durch Wirkungsgrad)
- relativ lange Anfahrzeit 3...30 s, abhängig von Aggregatgröße

Ausführungen

- mit Zentripetalturbine (a) oder Zentrifugalturbine (b)



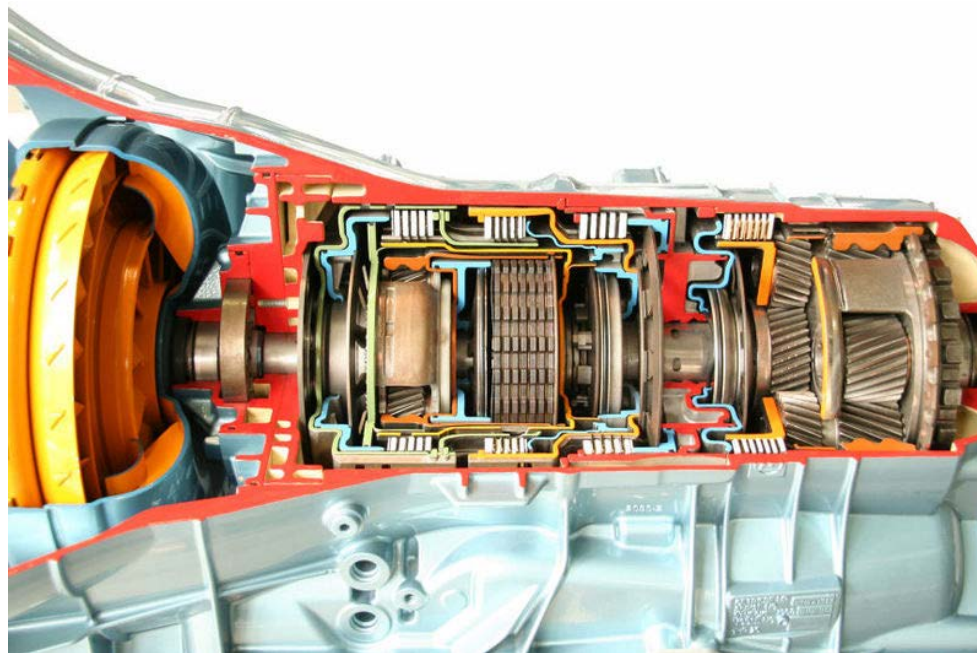
P: Pumpenrad
T: Turbinenrad
R: Leitrad

Quelle: VDI 2153

- mehrstufig: zusätzliche Turbinen- und Leiträder
- mehrphasig: Leitrad ist feststehend (Getriebe) oder freilaufend (Kupplung) → Trilokwandler
- verstellbar: Leitschaufeln verstellbar

Wandler-Automatikgetriebe

- Planetenradgetriebe mit hydraulischem Drehmomentwandler als Anfahr- und Wandler-Überbrückungskupplung
- Schalten ohne Zugkraftunterbrechung



Quelle: Wikipedia