

Sommersemester 2016

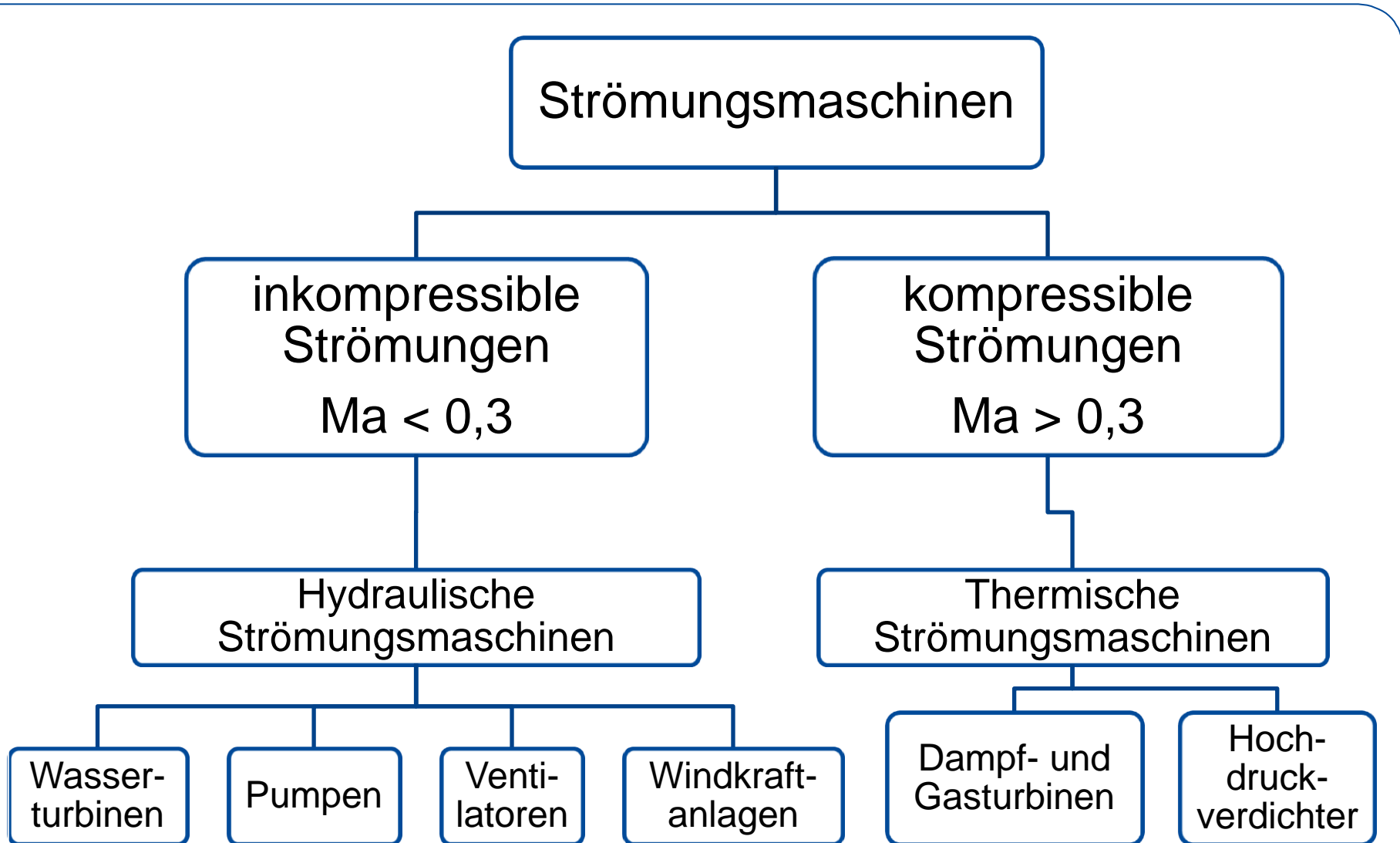
Kolben- und Strömungsmaschinen

Prof. Dr. Hendrik Wurm
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

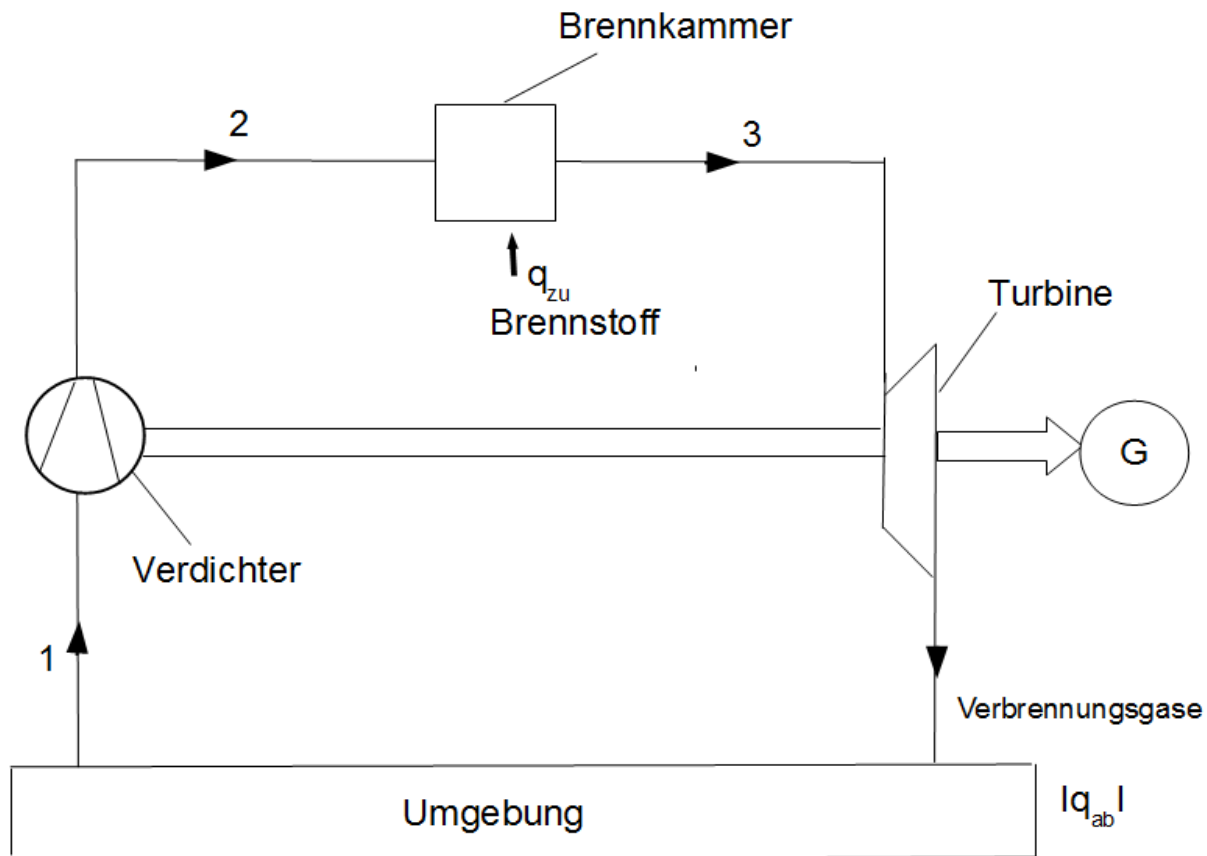
- Einführung, Arten und grundsätzlicher Aufbau von Strömungsmaschinen
- **Aufbau und Funktionsweise von Flugtriebwerken und den enthaltenen Strömungsmaschinen**
- Aufbau und Funktionsweise von Windturbinen
- Aufbau und Funktionsweise von Pumpen
- Entwurfsmethoden
- Optimierungsmethoden



<http://de.wikipedia.org/wiki/Mantelstromtriebwerk>

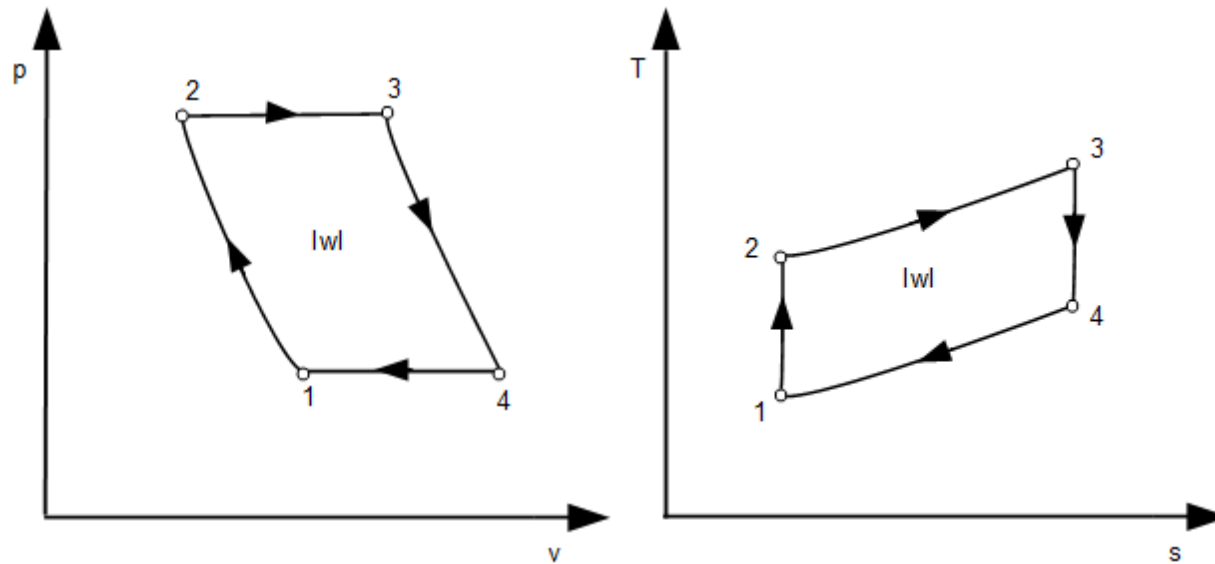


- Verdichter: Druckerhöhung der angesaugten Luft vor der Turbine
- Turbine: Erzeugung der mechanischen Leistung
- Brennkammer: Temperaturerhöhung des resultierenden Verbrennungsgases



Schaltschema einer offenen Gasturbinenanlage,
die nach dem Joule – Prozess arbeitet

Joule-Prozess



- 1-2 isentrope Kompression
- 2-3 isobare Wärmezufuhr
- 3-4 isentrope Expansion
- 4-1 isobare Wärmezufuhr

Tafelbilder

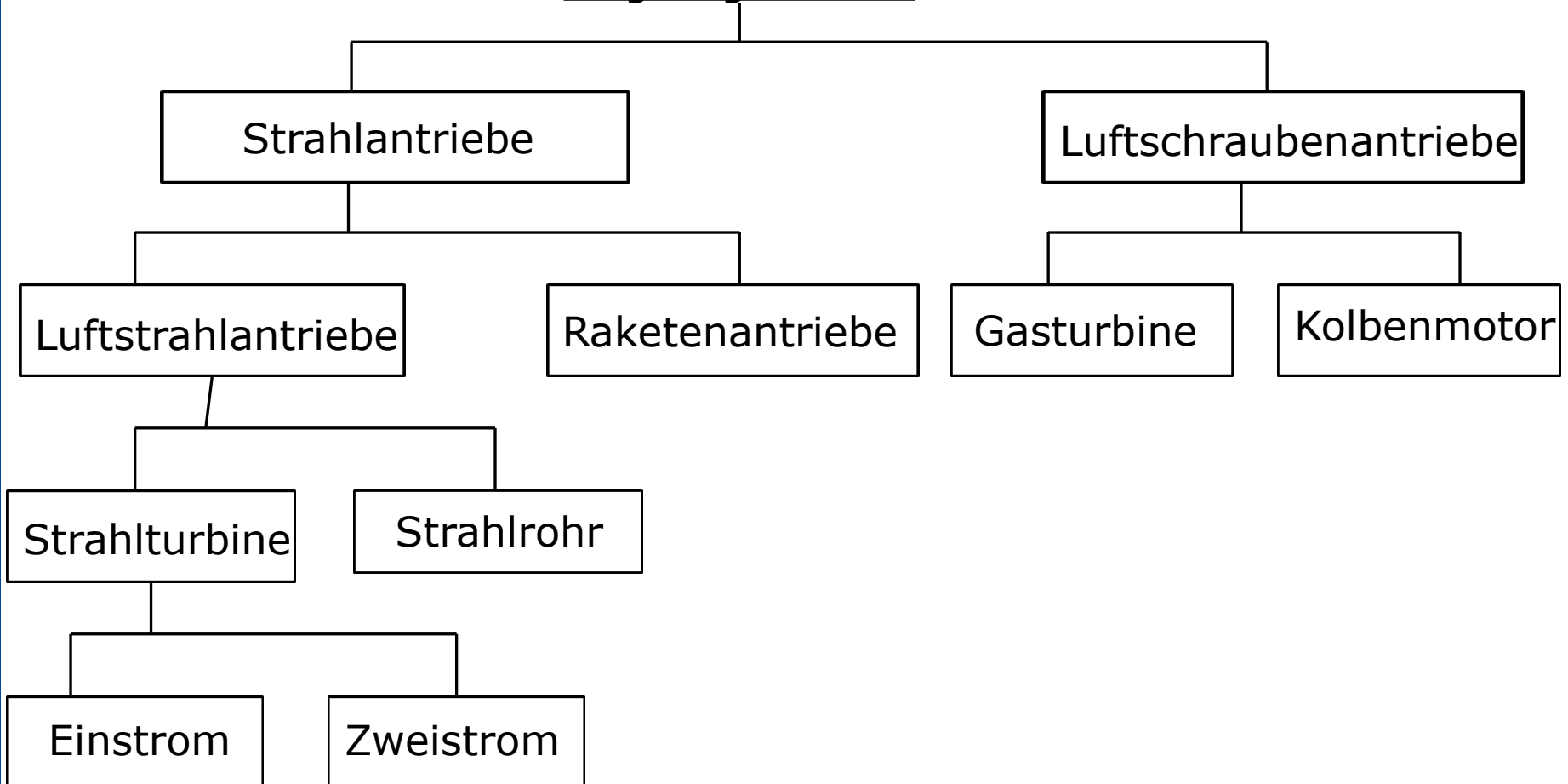
- Verluste durch Reibung, Mischung, Wärmeabgabe an die Umgebung, etc.
- Verluste in den Strömungsmaschinen (adiabate Kompression und Expansion nicht mehr reibungsfrei)
- Kühlluftbeimischung (bis zu 15% des Verdichteransaug-Massestromes)

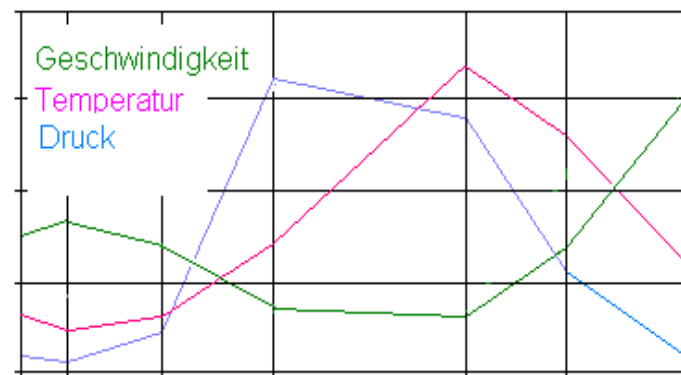
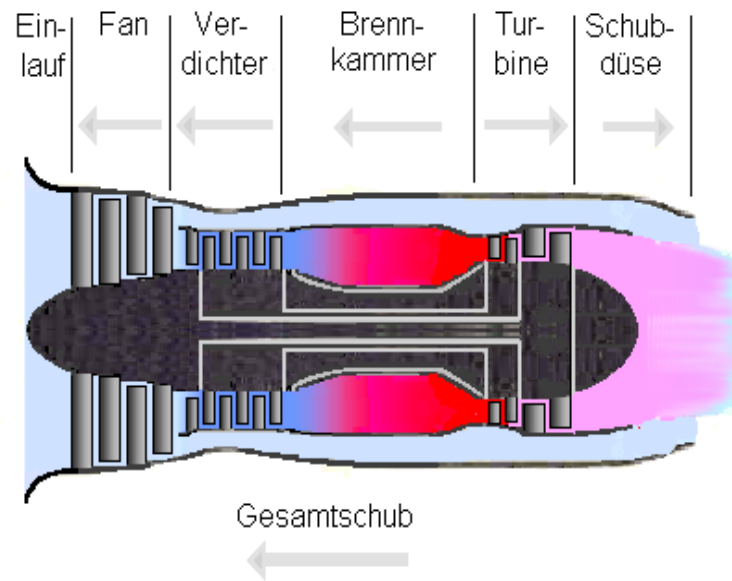


Wie kann ein Vortrieb erzeugt werden?

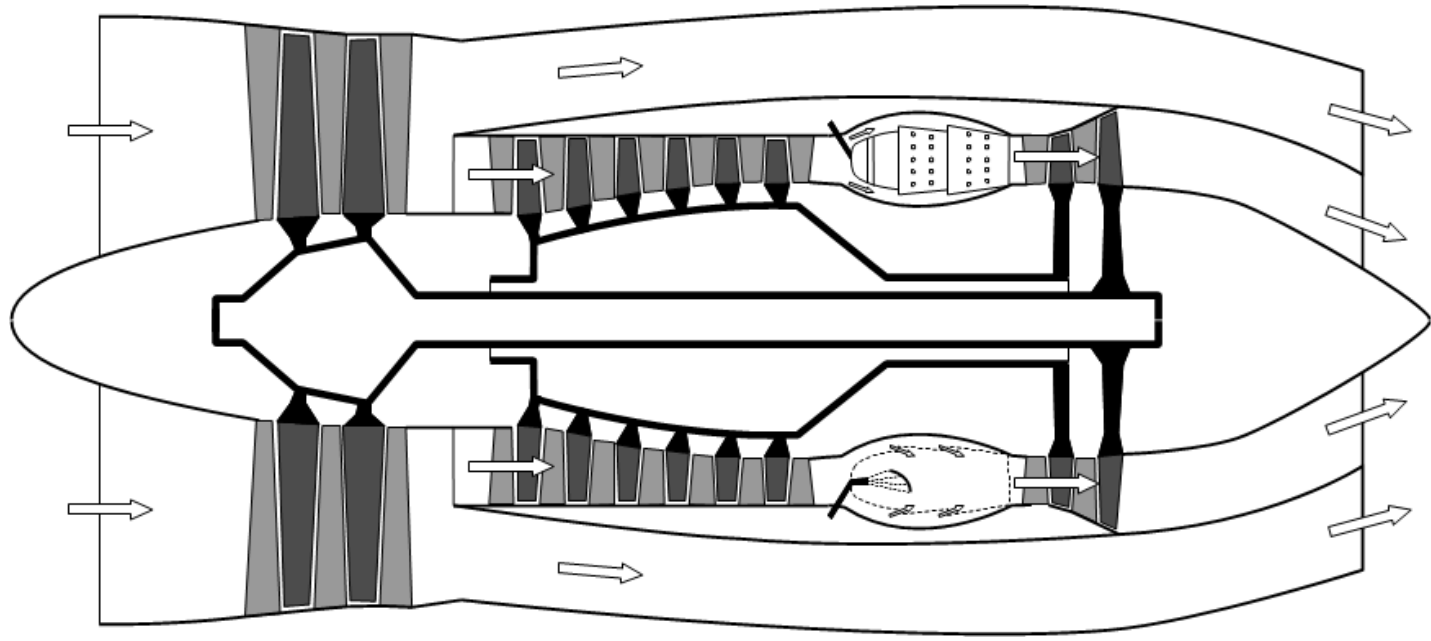
Aufgaben eines Flugtriebwerkes?

Flugzeugantriebe





Quelle: Wikipedia



Beispiel Ultraleichtflugzeug

Antrieb meist mit Verbrennungsmotor ca. 70 PS und Propeller

Reisegeschwindigkeit ca. 120 km/h bis 190 km/h

Startgeschwindigkeit ca. 60 km/h

Startrollstrecke ca. 60 m

Beispiel A380

2 Triebwerksmöglichkeiten

Rolls-Royce – Trent 900
Engine Allianz GP 7200

4 Triebwerke mit je ca. 300kN Schub

Gebläsedurchmesser 2,95m

Reisegeschwindigkeit $Ma = 0,85$

Startgeschwindigkeit ca. 380 km/h (abhängig von
verschiedenen Faktoren)

Landegeschwindigkeit 265 km/h

Startrollstrecke ca. 3 km

Listenpreis ca. 200 Mio. US\$

Rolls-Royce Trent 900

Fan - Spitzenmachzahl 1,5

Luftmassenstrom ca. 1 t/s

Dreiwelientriebwerk

Nebenstromverhältnis 8,5 : 1

Mitteldruckverdichter 8 Stufen

Hochdruckverdichter 6 Stufen

- Turbojet: Triebwerkseinlauf - Verdichter - Brennkammer - Turbine - Schubdüse
- Turbofan: Einlauf - Fan - Verdichter - Brennkammer - Turbine + Niederdruckturbine, die den Fan antreibt - Schubdüse
- Turboprop: Einlauf - Verdichter - Brennkammer - Turbine - Arbeitsturbine zum Antrieb eines Propellers zur Schuberzeugung



- Einlauf – Verdichter – Brennkammer – Turbine
- Vorteile: einfacher Aufbau
geringe Stirnfläche
- Ausführung mit und ohne Nachbrenner möglich
- Einsatz z.B. Lockheed F104G Starfighter

- Einlauf – Fan – Verdichter – Brennkammer – Turbine + Niederdruckturbine
- Aufteilung des Luftmassenstroms in Primär- und Sekundärmassestrom

$\dot{m}_{\text{primär}}$ - durchströmt Verdichter, Brennkammer etc.

$\dot{m}_{\text{sekundär}}$ - umströmt das Triebwerk

- Nebenstromverhältnis $\mu = \frac{\dot{m}_{\text{Fan}}}{\dot{m}_{\text{primär}}}$
- ausgeführte Verhältnisse: $0,3 \leq \mu \leq 9$

Schuberzeugung

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio



Ziel: Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Bewegungsgrößen und resultierender Kraft

Impuls $\mathbf{I} = m \cdot \mathbf{c}$

Impulssatz $\frac{d\mathbf{I}}{dt} = \mathbf{F}$ $\mathbf{F} = \frac{d}{dt} (m \cdot \mathbf{c}) = m \frac{d\mathbf{c}}{dt} + \mathbf{c} \frac{dm}{dt} = \frac{d\mathbf{I}}{dt}$

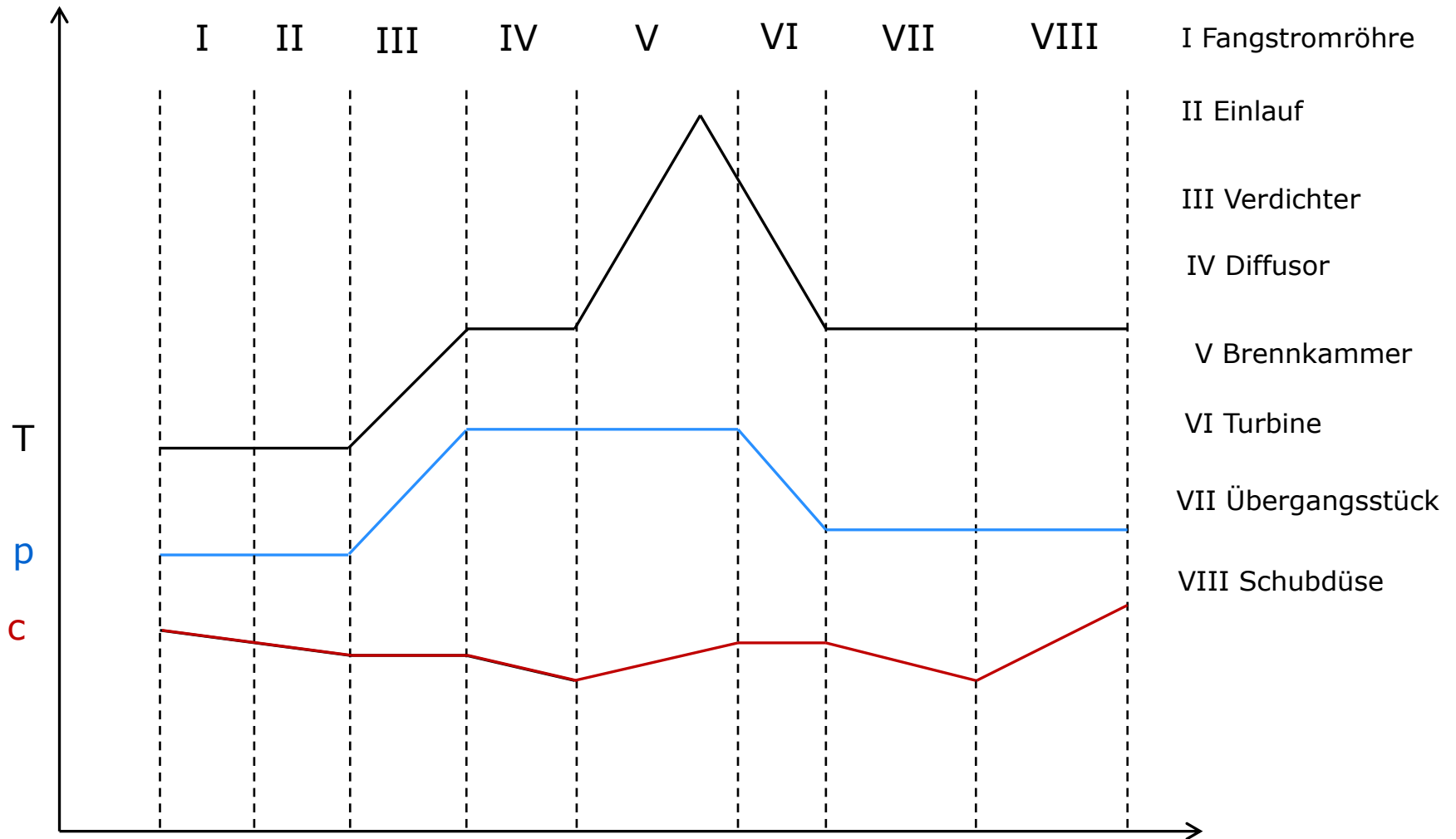
Die zeitliche Änderung des Impulses einer Masse m ist gleich der resultierenden Kraft, die auf das Masselement ausgeübt wird.

Annahme: Triebwerksschub ist ausschließlich axial gerichtet

$$\mathbf{F} = \mathbf{c}_A(\dot{m}_0 + \dot{m}_B - \dot{m}_Z) - \mathbf{c}_0 \cdot \dot{m}_0 + A_A(p_A - p_0)$$

Tafelbilder

Qualitativer Verlauf von Geschwindigkeit, Druck und Temperatur



Wie findet die Energieübertragung im Rotor statt?

Ziel: Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Bewegungsgrößen und resultierender Kraft

Impuls $\mathbf{I} = m \cdot \mathbf{c}$

Impulssatz $\frac{d\mathbf{I}}{dt} = \mathbf{F}$

Die zeitliche Änderung des Impulses einer Masse m ist gleich der resultierenden Kraft, die auf das Masselement ausgeübt wird.

Wie findet die Energieübertragung im Rotor statt?

Eine analoge Aussage gilt für den Zusammenhang von Drehimpuls und Moment

Drehimpuls $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{I}$

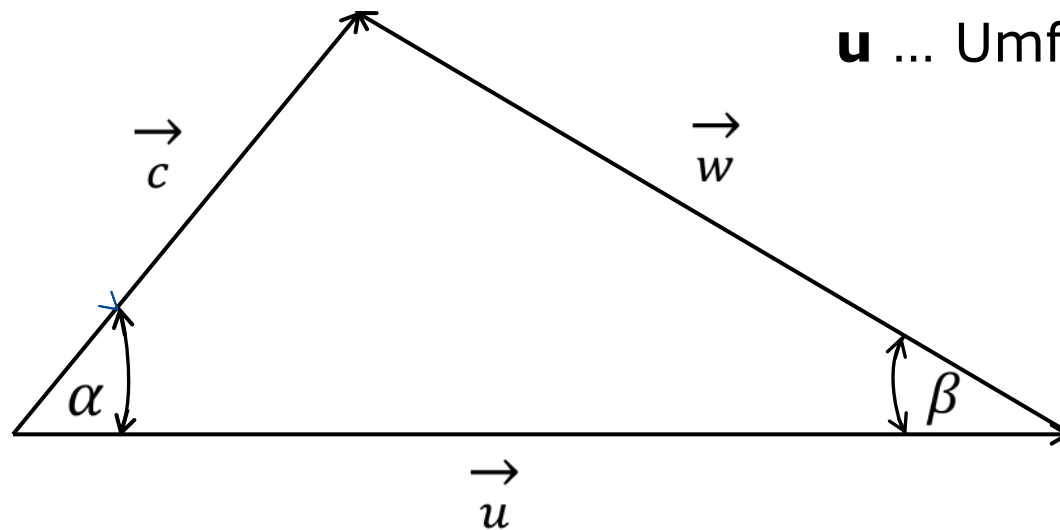
Drehimpulssatz $\frac{d\mathbf{L}}{dt} = \mathbf{M}$

Die zeitliche Änderung des Drehimpulses (Impulsmoments) einer Masse m ist gleich dem resultierenden Moment (bezogen auf einen Bezugspunkt O).

Annahmen :

- Strömung ist stationär
- Ansetzen mittlerer Geschwindigkeiten
- Vernachlässigung des Drehimpulsbeitrages, der aus den turbulenten Schubspannungen in Umfangausrichtung an den Bilanzflächen 1 und 2 vorhanden ist.

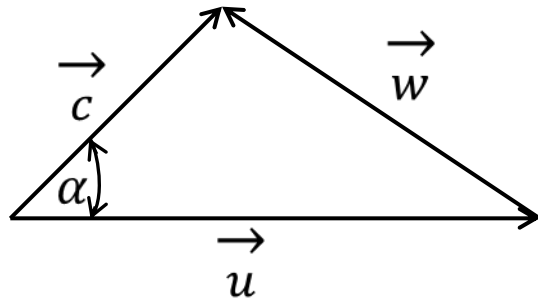
$$M_{\tau} \approx 1 \% \text{ von } M_{\text{sch}}$$



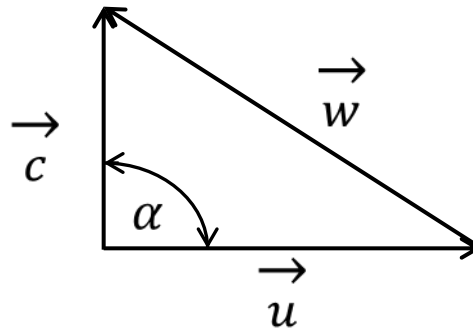
c ... Absolutgeschwindigkeit
w ... Relativgeschwindigkeit
u ... Umfangsgeschwindigkeit

$$\vec{c} = \vec{u} + \vec{w}$$

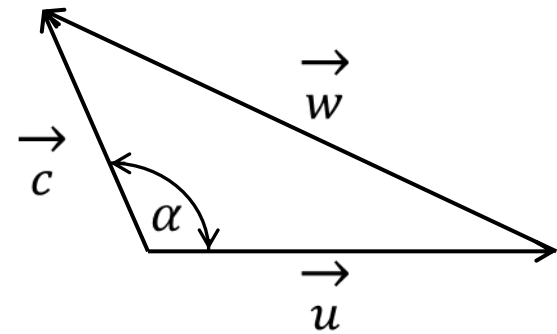
Die Absolutgeschwindigkeit ist gleich der vektoriellen Summe aus Relativ- und Umfangsgeschwindigkeit



Mitdrall $\alpha < 90^\circ$



drallfrei $\alpha = 0$



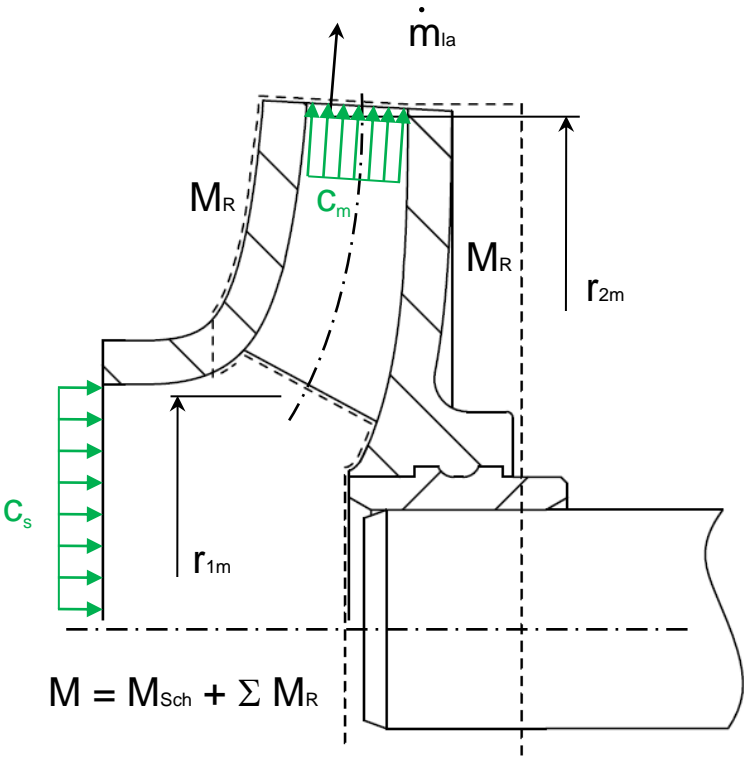
Gegendrall $\alpha > 90^\circ$



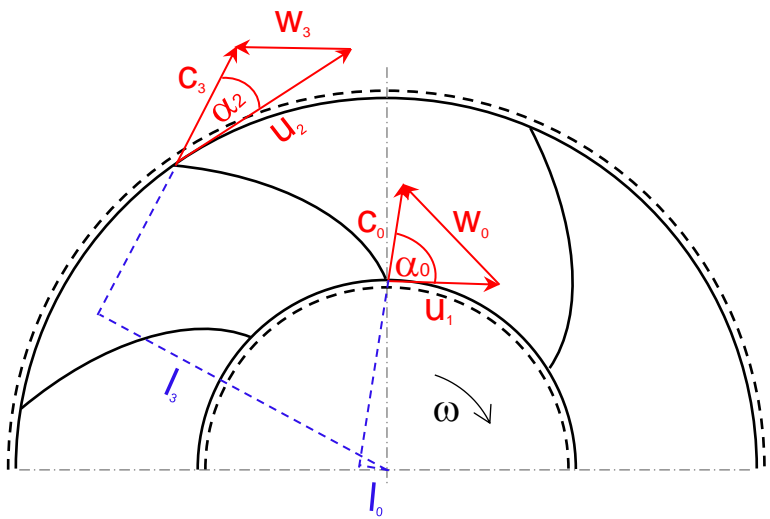
Index:

- 0... auf der Saugseite des Laufrades, unmittelbar vor den Schaufeln
 - 1... unmittelbar nach dem Eintritt in den Schaufelkanal des Laufrades
 - 2... unmittelbar vor dem Austritt aus dem Schaufelkanal des Laufrades
 - 3... auf der Druckseite des Laufrades, unmittelbar hinter den Schaufeln
 - 4... unmittelbar vor dem Schaufelkanal des Leitrades
 - 5... unmittelbar nach dem Eintritt in den Schaufelkanal des Leitrades
 - 6... unmittelbar vor dem Austritt aus dem Schaufelkanal des Leitrades
 - 7... unmittelbar hinter den Schaufeln des Leitrades
- usw.

Anwendung des Drehimpulssatzes



Kontrollvolumen



Bilanz des Drehimpulses

Bilanzfläche 1 :

Massestrom \dot{m}_{La} mit dem Drehimpuls $\dot{m}_{La} r_{1m} \cdot C_{ou}$

Bilanzfläche 2 :

Massestrom \dot{m}_{La} mit dem Drehimpuls $\dot{m}_{La} r_{2m} \cdot C_{3u}$

Die statischen Drücke an den Bilanzflächen und die radialen Komponenten der Geschwindigkeit erzeugen keine Kräfte in Umfangsrichtung und werden deshalb nicht berücksichtigt.

an den festen Berandungen

Moment wegen der Radseitenreibung M_R

an der Welle

übertragenes Drehmoment M

$$M = M_{\text{sch}} + \Sigma M_R$$

an der Welle übertragenes Moment

$$M_{\text{sch}} = \dot{m} (r_{2m} c_{3u} - r_{1m} c_{ou})$$

Moment

von den Schaufeln übertragenes

mit $u = \omega r$

$$P_{\text{sch}} = M_{\text{sch}} \cdot \omega = \dot{m} (u_{2m} c_{3u} - u_{1m} c_{ou})$$

Leistung

$$Y_{\text{sch}} = \frac{P_{\text{sch}}}{\dot{m}}$$

spezifische Förderarbeit

$$Y_{\text{sch}} = u_{2m} c_{3u} - u_{1m} c_{ou}$$

**Euler'sche Turbinengleichung
(1754)**

andere Schreibweise der Turbinengleichung

$$Y_{\text{sch}} = \mathbf{u}_{2m} \mathbf{c}_{3u} - \mathbf{u}_{1m} \mathbf{c}_{0u}$$

Anwendung der trigonometrischen Beziehungen

$$Y_{\text{sch}} = \frac{\mathbf{u}_2^2 - \mathbf{u}_1^2}{2} + \frac{\mathbf{c}_3^2 - \mathbf{c}_0^2}{2} + \frac{\mathbf{w}_0^2 - \mathbf{w}_3^2}{2}$$

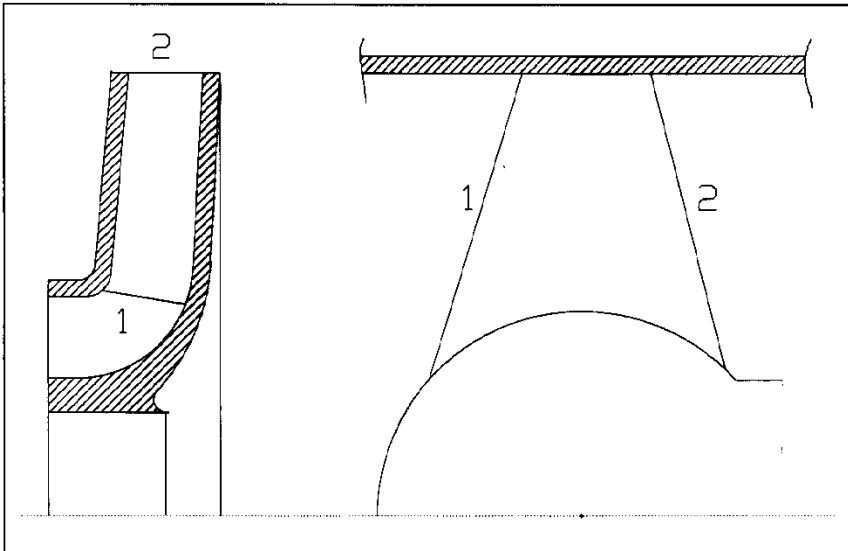
$$g \times H_{th} = \left[U_2 C_{2U} - U_1 C_{1U} \right] \quad \text{Gleichung von L. Euler}$$

$$g \times H_{th} = \left[\underbrace{\frac{C_2^2 - C_1^2}{2}}_A + \underbrace{\frac{U_2^2 - U_1^2}{2}}_B + \underbrace{\frac{W_1^2 - W_2^2}{2}}_C \right]$$

Term A :
abhängig von den
Durchmessern
des Saug- und
Druckstutzens

Term B :
abhängig vom
Durchmesser-
unterschied zwischen Ein-
und
Austrittskante

Term C :
abhängig von der
Gestaltung des Innenraums
im Laufrad



Vordrall



$$Y_{\text{sch}} = \mathbf{u}_2 \mathbf{c}_{3u} - \mathbf{u}_1 \mathbf{c}_{ou}$$

$$\mathbf{c}_{uo} \neq 0 \quad (\alpha_0 \neq 90^\circ)$$

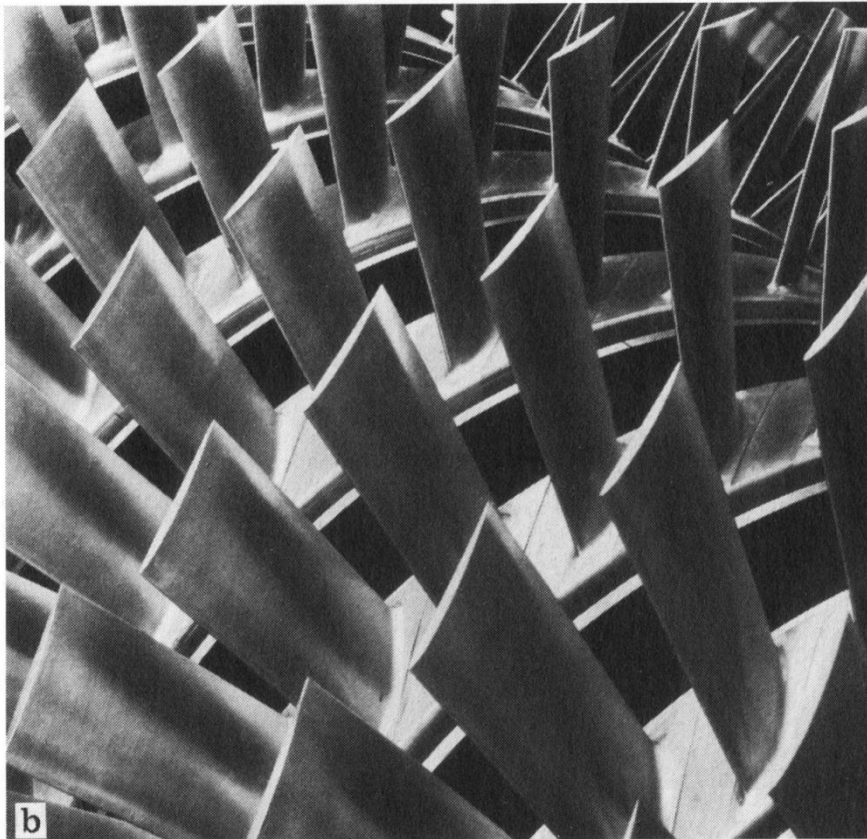
$$\text{Mitdrall} \quad (\alpha_0 < 90^\circ)$$

Förderhöhe wird reduziert

$$\text{Gegendrall} \quad (\alpha_0 > 90^\circ) \\ \text{vergrößert}$$

Förderhöhe wird

Verdichter



entnommen aus: Fister, W.: Fluidenergiemaschinen

- Verdichtung von Gas aus einem Anfangszustand (p_{RS} , T_{RS}) auf den Enddruck p_{RD}

Druckverhältnis $\pi = \frac{p_{RD}}{p_{RS}}$

- Verzögerung der Relativgeschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit beachten!)

Energiebilanz:

eintretende Energieströme: $\dot{m} \cdot h_{RS}$

$$M_k \cdot \omega$$

austretende Energieströme: $\dot{m} \cdot h_{RD}$
 q

$$\frac{M_k \cdot \omega}{\dot{m}} = \Delta h_R + q$$

Annahme ideales Gas: $p_R = \rho_R \cdot R \cdot T_R$

$$\Delta h_R = c_p \cdot \Delta T_R$$

mit
$$\frac{T_{RD}}{T_{RS}} = \left(\frac{p_{RD}}{p_{RS}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot e^{\frac{s_D-s_S}{c_p}}$$

wird
$$\frac{M_k \cdot \omega}{\dot{m}} = c_p \cdot T_{RS} \left(\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot e^{\frac{\Delta s}{c_p}} - 1 \right) + q$$



Einflussgrößen: Eigenschaften des Gases

 Ansaugtemperatur

 Prozessführung ($\Delta s, q$)

Aufgabe: Verbrennung des Luft – Brennstoff – Gemisches

Prozess: verdichtete Luft aus dem Verdichter + chemische im Brennstoff vorhandene Energie werden in Wärmeenergie umgewandelt

→ Heissgas strömt in anschließende Turbine



- im Schaufelgitter wird die Strömung beschleunigt
- neben der strömungstechnischen Auslegung ist die Lösung konstruktiver Aufgaben die größte technische Herausforderung
- die Turbineneintrittstemperatur hat wesentlichen Einfluss auf die Schubkraft des Triebwerkes