



Thermodynamik III

3 – Gasarbeitsprozesse Gasturbinenprozesse

HS 2021

Prof. Reza S. Abhari

Dr. Ndaona Chokani

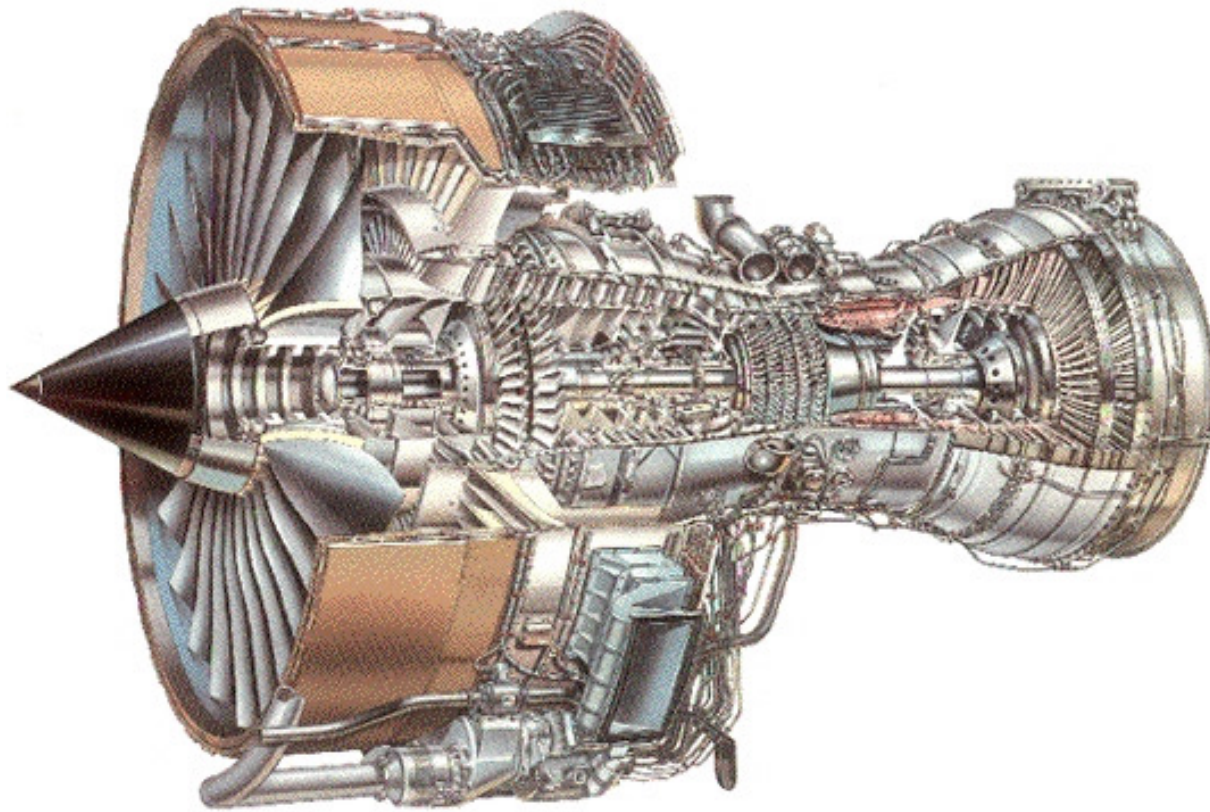


Overview

Vorlesung		Übung/Beispiel	
Datum	Thema	Datum	Thema
09.11	Prozess des Energieaustausches	09.11	Geschwindigkeitsdreiecke
16.11	Dampfkraftprozesse	16.11	Rankine Zyklus
23.11	Gasarbeitsprozesse - Verbrennungsmotoren	23.11	Diesel / Otto Zyklus
30.11	Gasarbeitsprozesse - Gasturbinenprozesse	30.11	Brayton Zyklus
07.12	Gasarbeitsprozesse - Kombinierten Zyklen	07.12	Kombinierter Zyklus
14.12	Kältemaschinen und Wärmepumpen	14.12	Kältemaschine/Wärmepumpe
21.12	Kältemaschinen Oxyfuel, Carbon Capture and Storage	21.12	Wärmepumpe

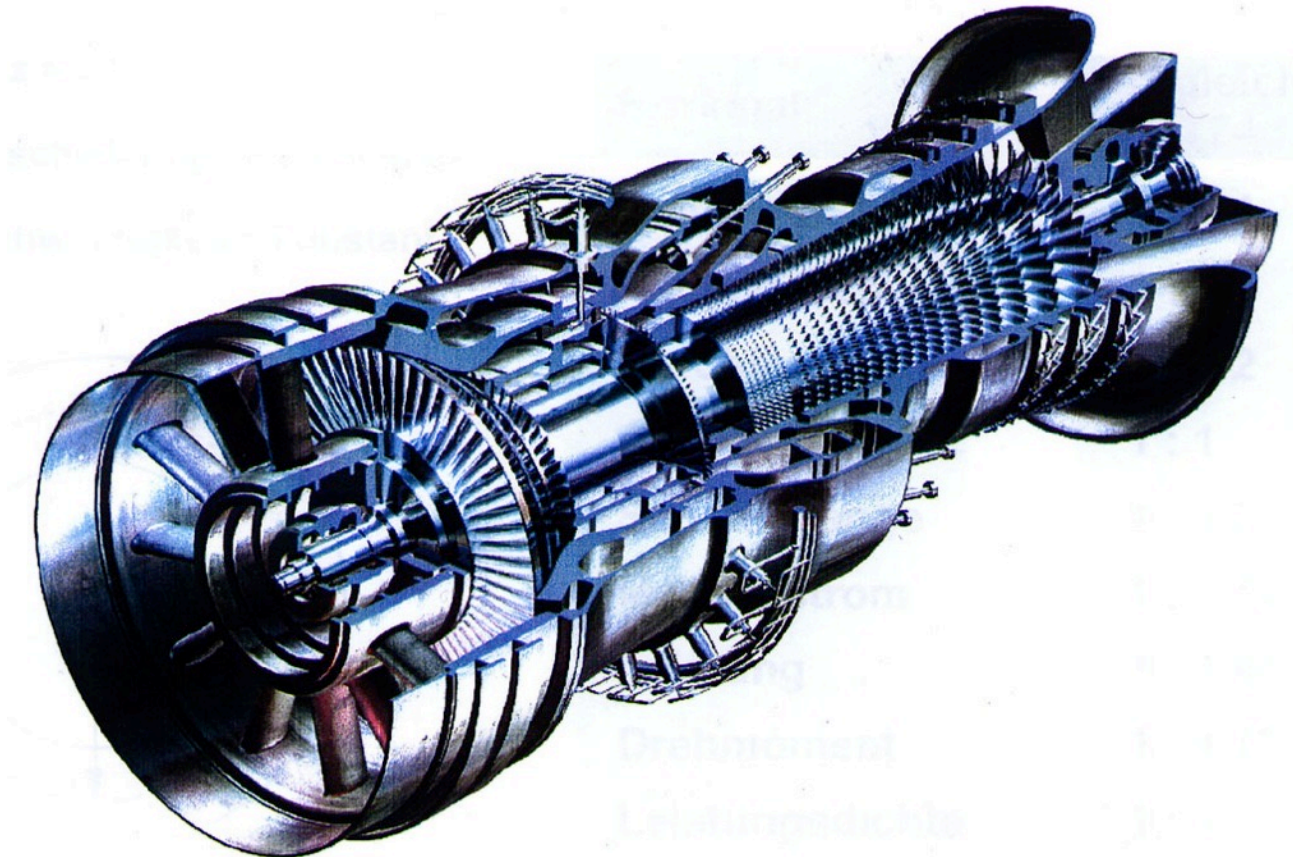


4.2 Gasturbinenprozesse (Joule-Brayton)



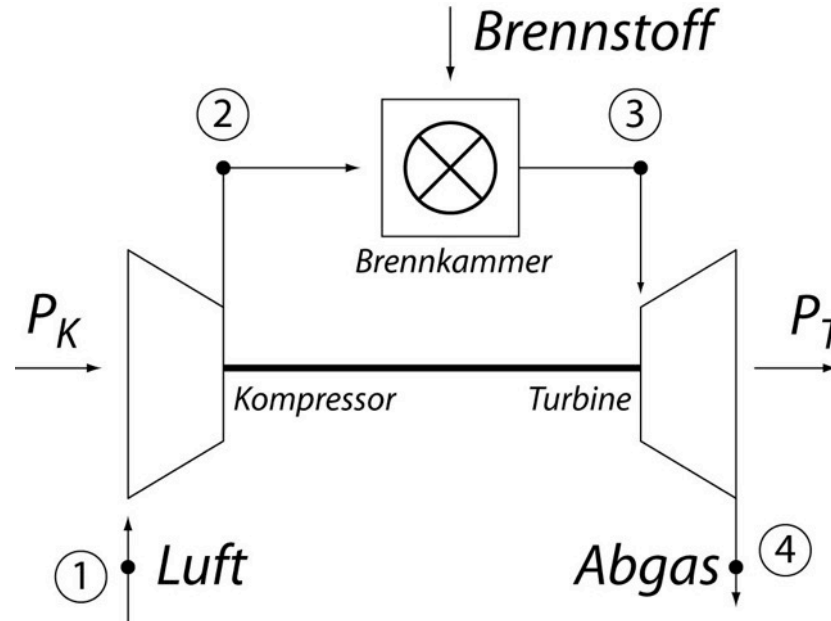


Gas Turbines Used for Power Generation: GE GT 24/26





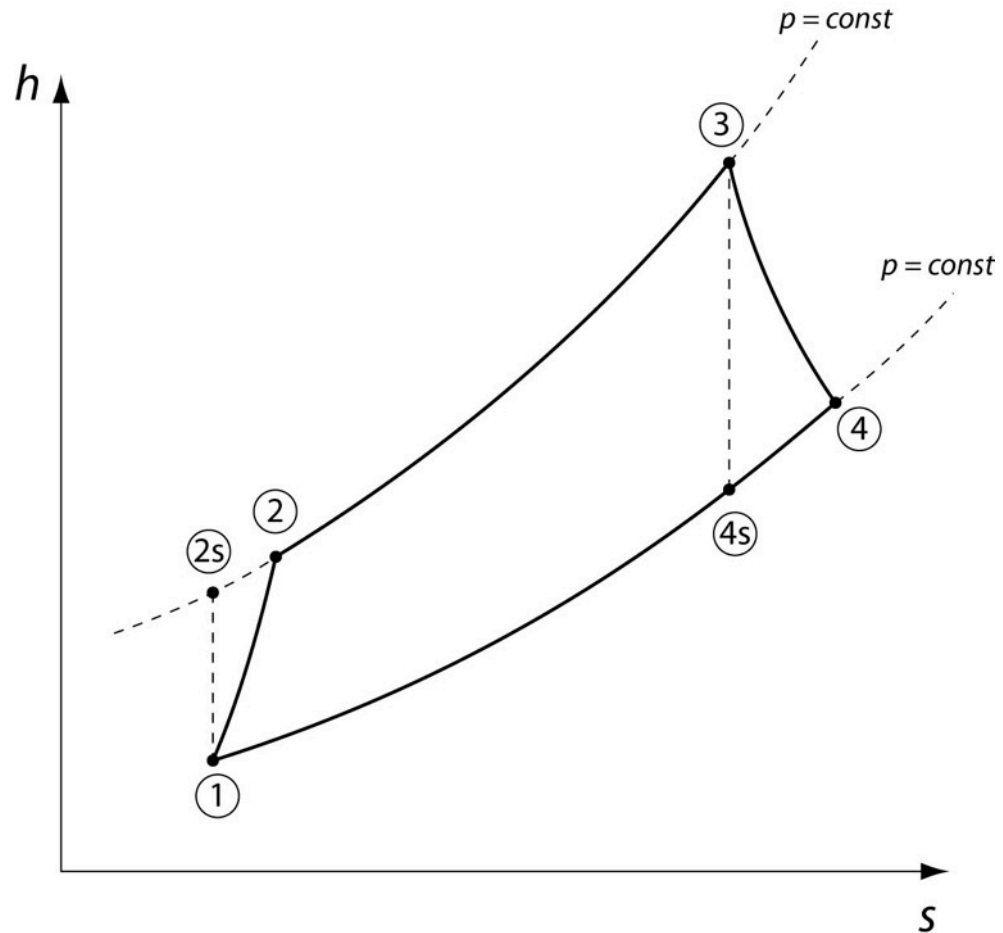
4.2.1 Offene Gasturbinenanlage



- Brennstoff wird in der Brennkammer mit der verdichteten und vorgewärmten Luft verbrannt
- Höchste Temperatur T_3 wird durch die Werkstofffestigkeit bestimmt, d.h. Verbrennung wird mit grossem Luftüberschuss (mager) geführt



- Annahmen: ideales Gas mit konstantem c_p , Vernachlässigung der Druckverluste im Erhitzer und Kühler



Nutzarbeit w_N des Prozesses ist die Differenz zwischen der Turbinenarbeit w_{34} und der zum Antrieb des Verdichters erforderlichen Arbeit w_{12}



$$w_N = \eta_m [w_{34} - w_{12}]$$

- η_m berücksichtigt mechanische Verluste

- Einführung des Druckverhältnisses λ :
$$\lambda = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

- Annahme: Turbine und Verdichter arbeiten adiabat:

$$w_N = \eta_m [(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] = \eta_m \left[\eta_{sT} (h_3 - h_{4s}) - \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_{sV}} \right]$$

η_{sT} = isentroper Wirkungsgrad der Turbine

$$\eta_{sT} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = \frac{\text{reale Arbeit}}{\text{ideale Arbeit}} \leq 1$$

η_{sV} = isentroper Wirkungsgrad des Verdichters

$$\eta_{sV} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{\text{ideale Arbeit}}{\text{reale Arbeit}} \leq 1$$



$$h_3 - h_{4s} = c_p(T_3 - T_{4s}) = c_p T_3 \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)$$

$$h_{2s} - h_1 = c_p(T_{2s} - T_1) = c_p T_1 (\lambda - 1) \quad \lambda = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$w_N = c_p T_1 \eta_m \left[\eta_{sT} \frac{T_3}{T_1} \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) - \frac{\lambda - 1}{\eta_{sV}} \right]$$

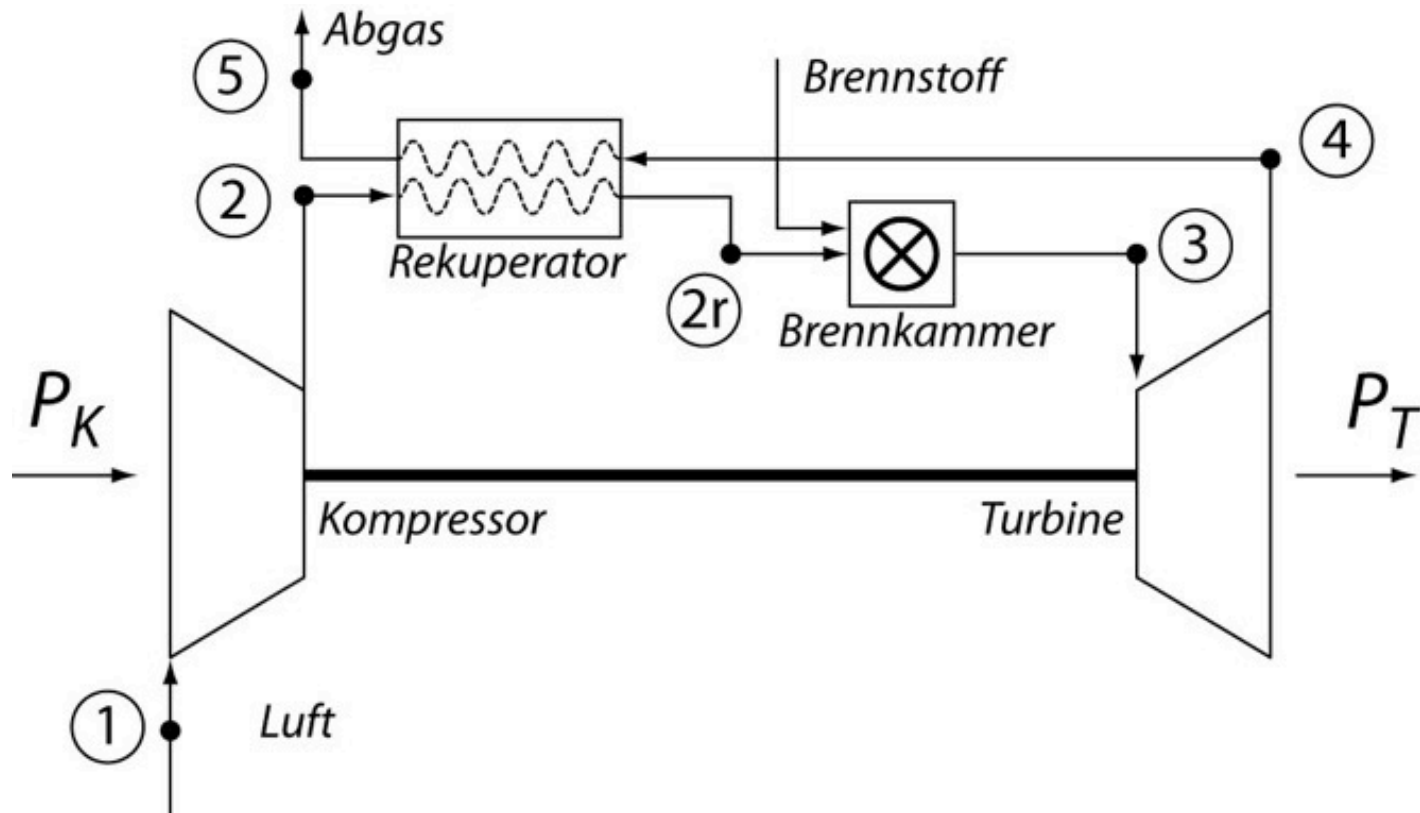
- Mit wachsendem Druckverhältnis p_2/p_1 , d.h. mit wachsendem λ , wird die Turbinenarbeit und die davon abzuziehende Verdichterarbeit grösser
- Mittels $dw_N/d\lambda = 0$ folgt das optimale Druckverhältnis:

$$\lambda_{opt} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \sqrt{\eta_{sT} \eta_{sV} (T_3/T_1)}$$



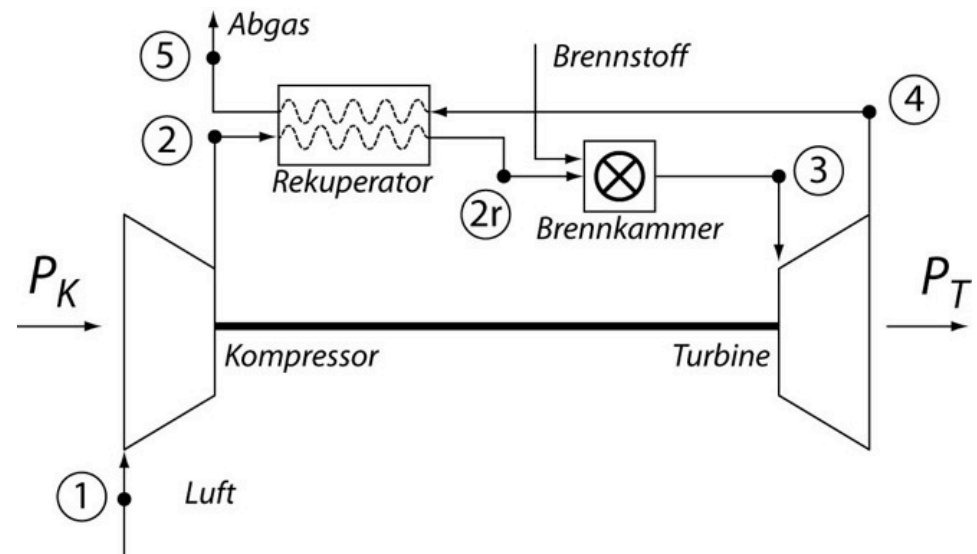
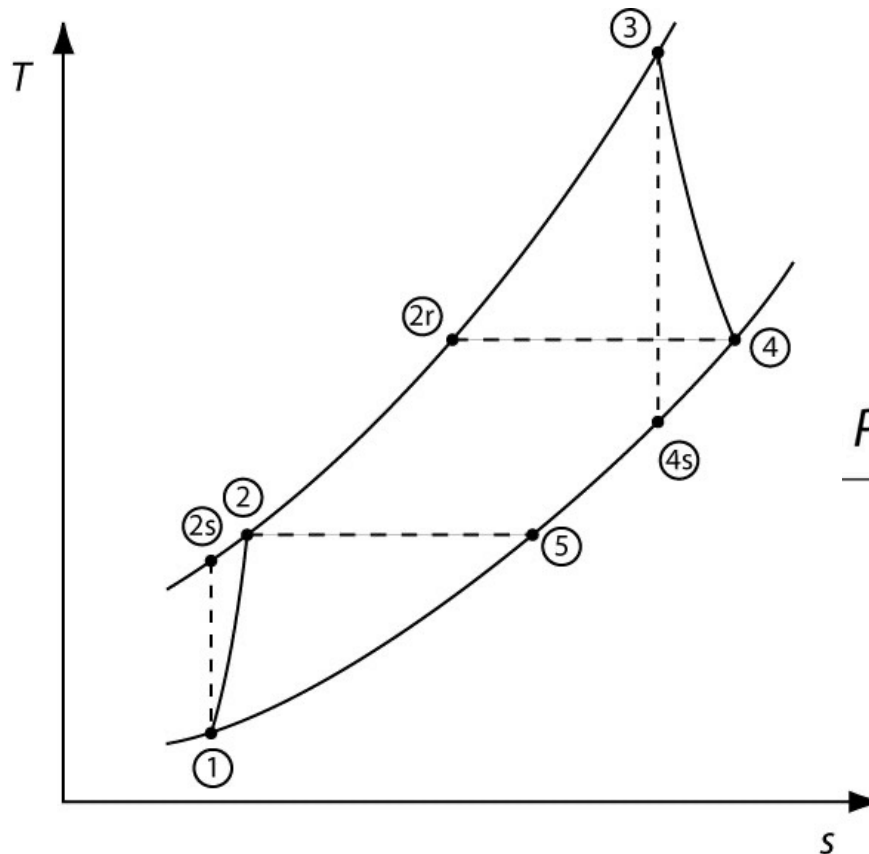
4.2.2 Verbesserung von Gasprozessen

- Rekuperation: Luftvorwärmung





- Die Wärme des Abgases wird genutzt, um die Verbrennungsluft vorzuheizen
- Für einen idealen Rekuperator gilt: $T_{2r} = T_4$





$$\eta_{therm} = \frac{c_{p34}(T_3 - T_4) - c_{p12}(T_2 - T_1)}{c_{p34}(T_3 - T_4)}$$

$$= 1 - \frac{c_{p12}}{c_{p34}} \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4}$$

ideal

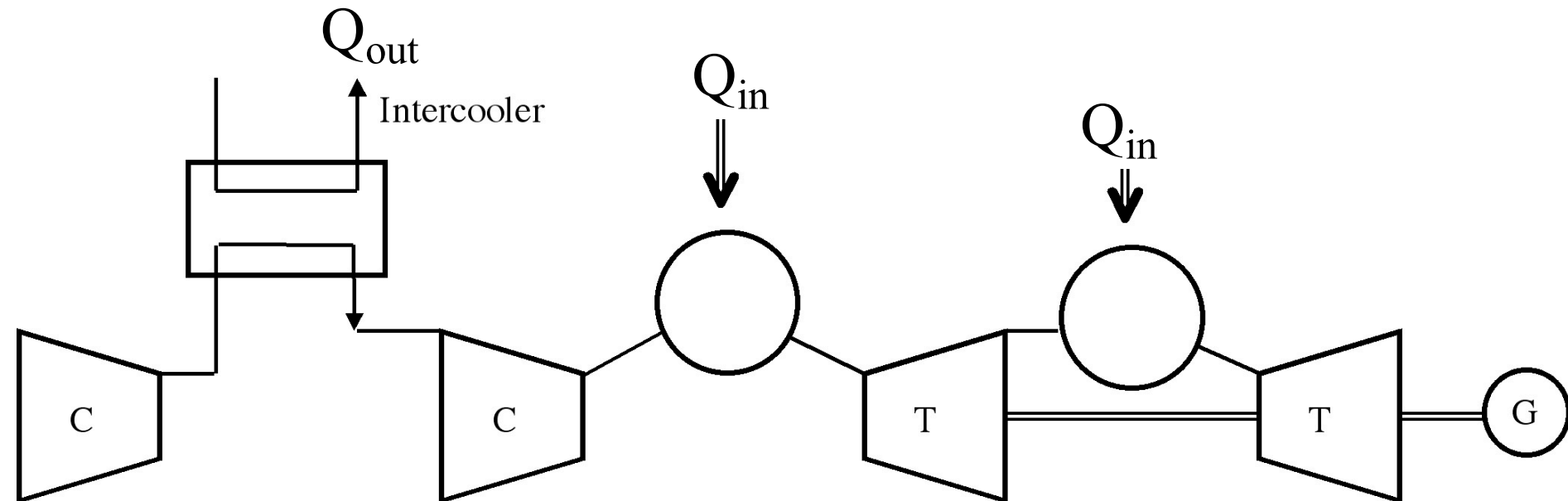
$$= 1 - \frac{c_{p12}}{c_{p34}} \frac{(\lambda - 1)}{t \eta_c \eta_t \left[1 - \frac{1}{\lambda} (1 - \varepsilon)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right]}$$

verlustbehaftet

- wobei $\lambda = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$, $t = \frac{T_3}{T_1}$ ε = Druckverlust in Brennkammer
- Nur für kleine Werte von λ sinnvoll



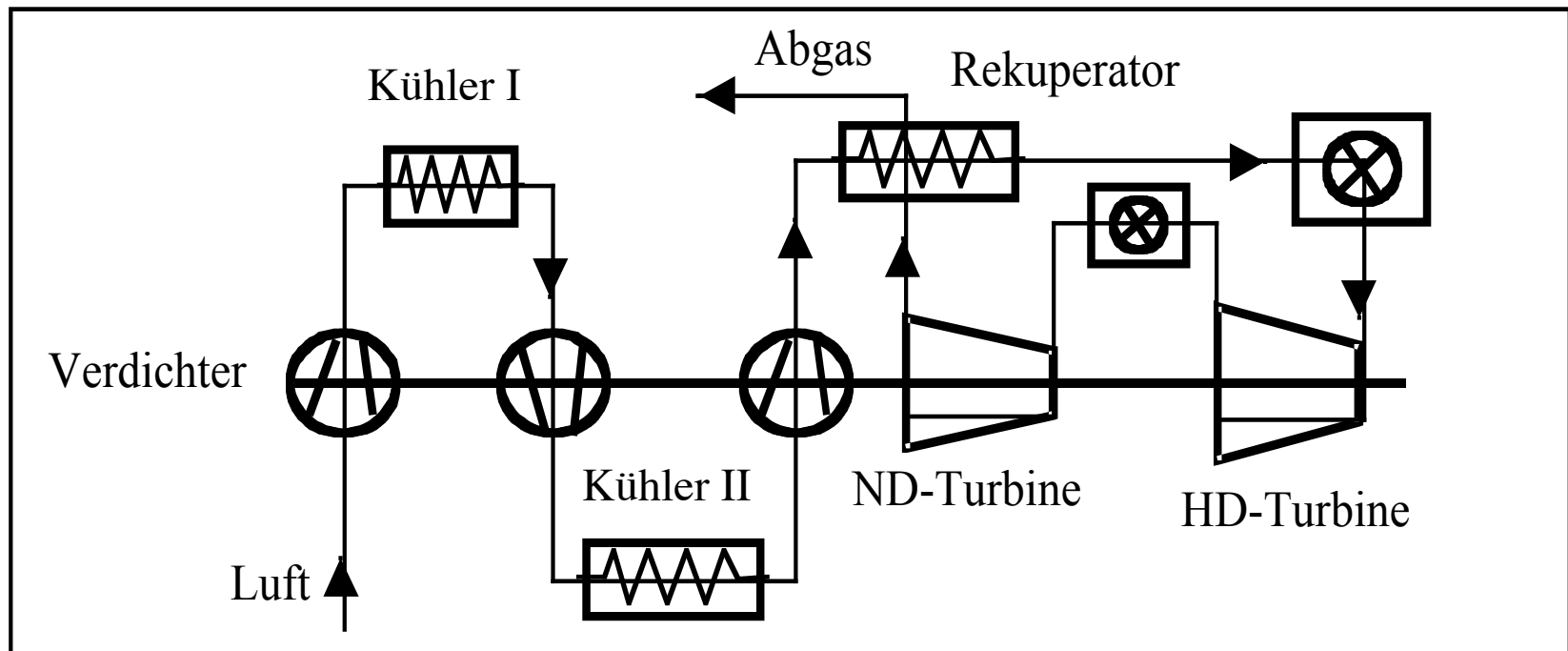
4.2.3 Nacherhitzung und Zwischenkühlung



Beispiele aus der Industrie: GT24, GT26 von GE

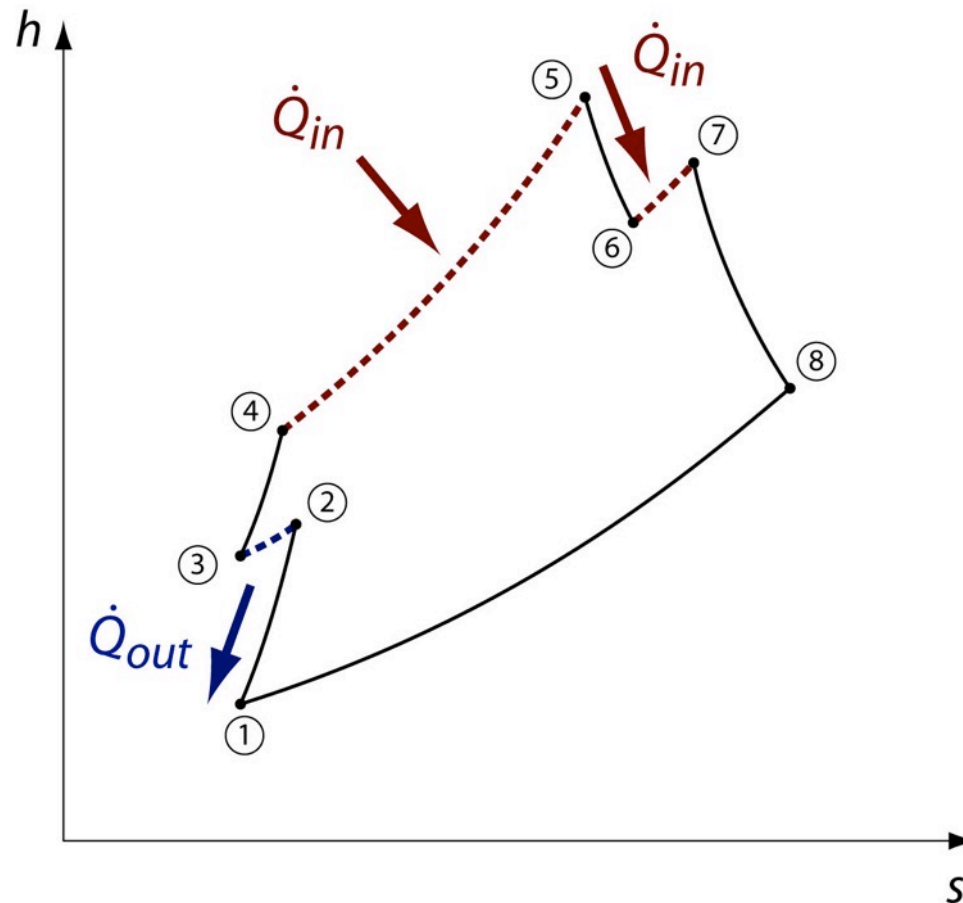


- Mehrstufige Luftverdichtung mit Zwischenkühlung
- Expansion in Hochdruck (HD) - und Niederdruck (ND) - Turbine mit Zwischenerhitzung





- Nacherhitzung erhöht die von der Turbine abgegebene Leistung
- Zwischenkühlung reduziert Verdichterleistung



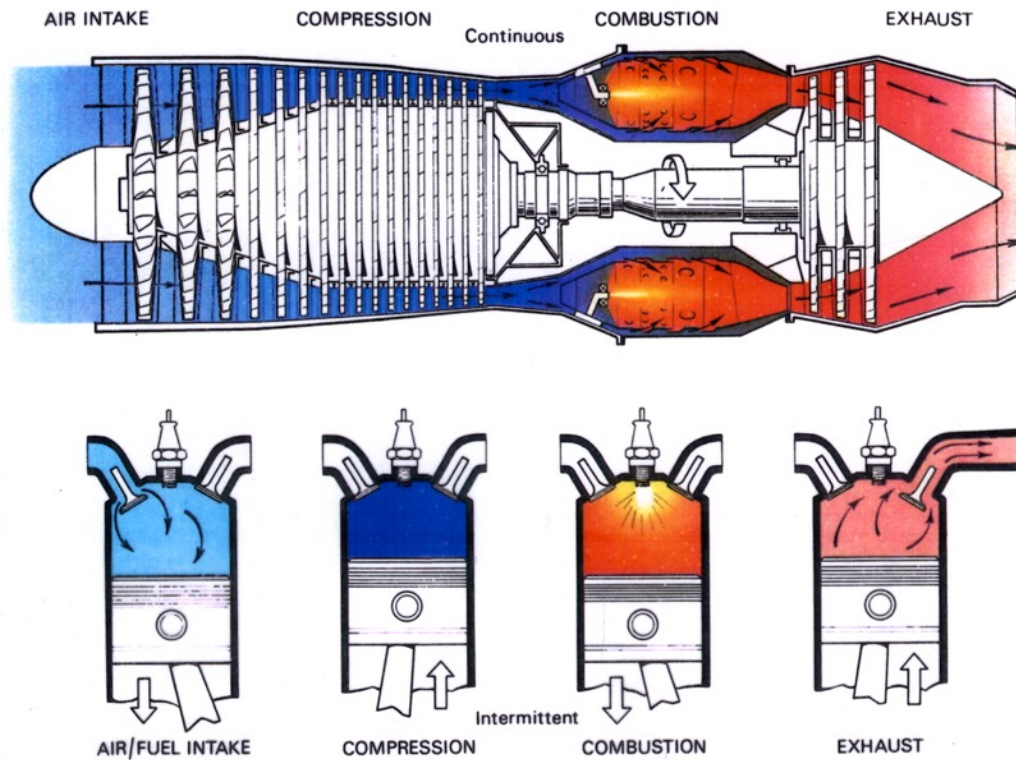


Fig. 2-1 A comparison between the working cycle of a turbo-jet engine and a piston engine.

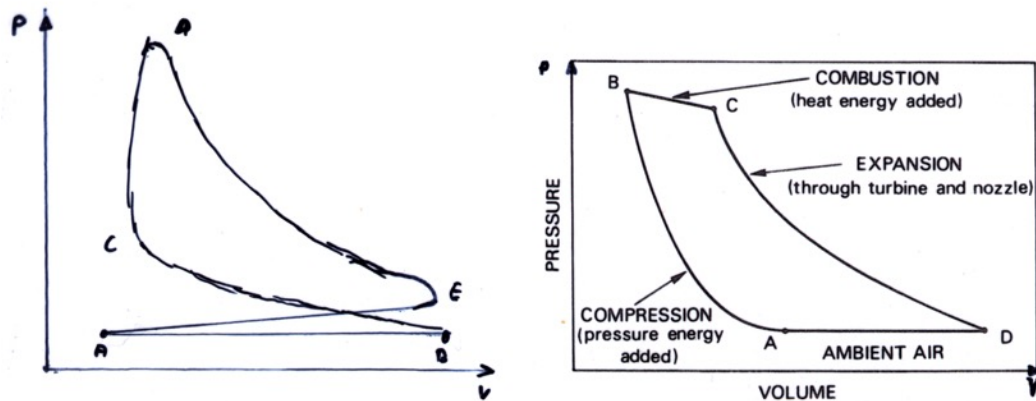
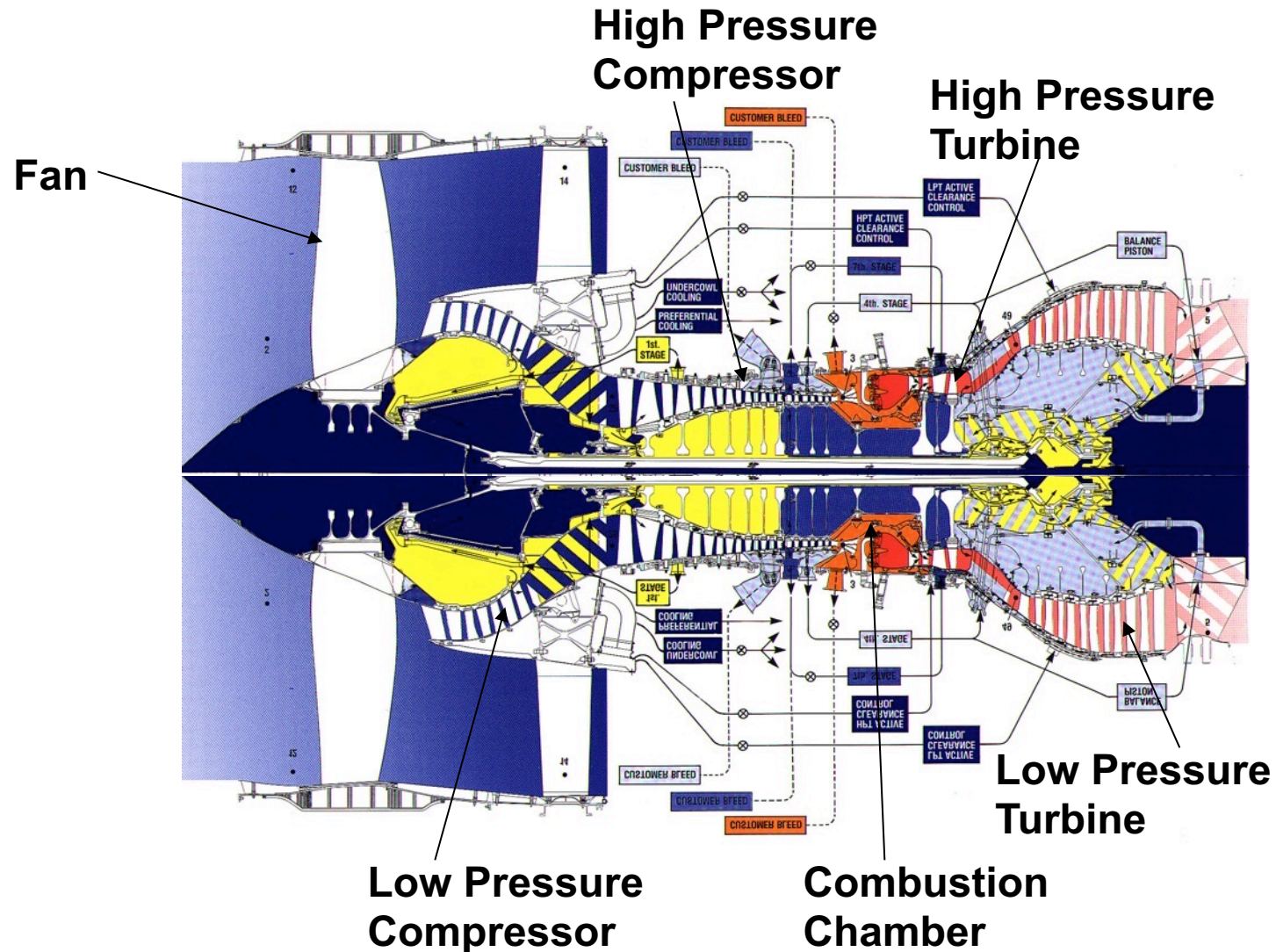


Fig. 2-2 The working cycle on a pressure-volume diagram.



Internals of an Aircraft Engine

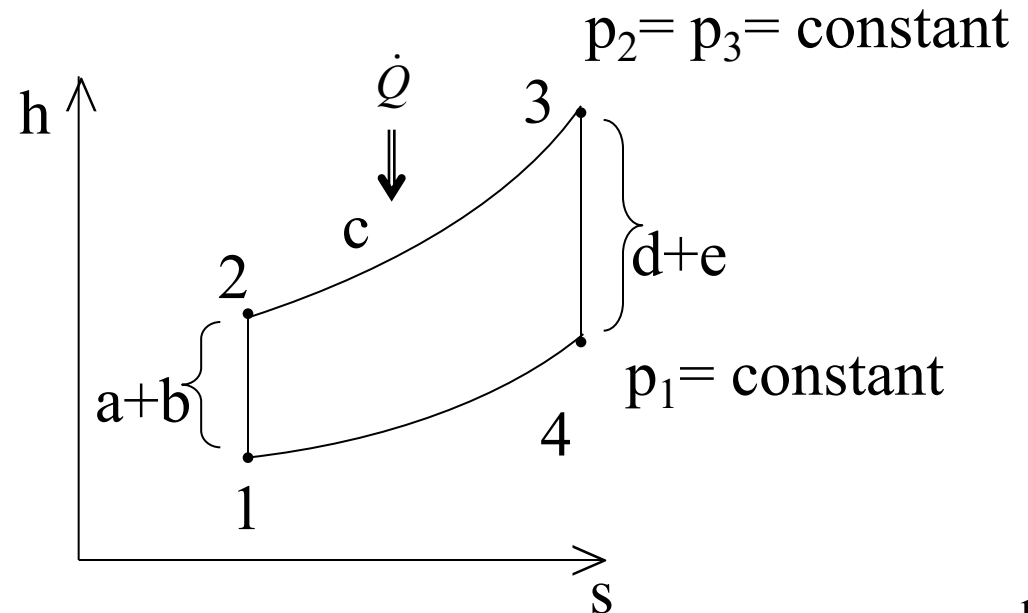
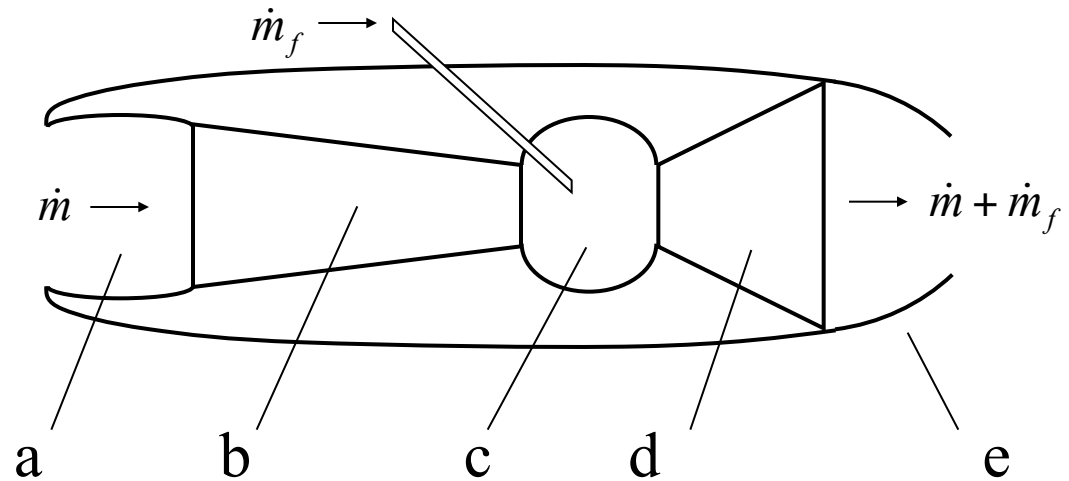




4.2.4 Joule-Brayton Cycle

– Besteht aus:

- a) Inlet
- b) Compressor
- c) Combustor
- d) Turbine
- e) Exhaust





- Massenströme:

$$\dot{m} = \text{Luftmassenstrom}$$

$$\dot{m}_f = \text{Brennstoffmassenstrom}$$

- Impulserhaltung in x-Richtung ergibt Schubkraft (thrust):

$$F = (\dot{m} + \dot{m}_f) \cdot u_e - \dot{m} \cdot u_0$$

- Einführung des Brennstoff-Luft-Verhältnisses f : $f = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}}$
Normalerweise $0.01 < f < 0.03$

- Schallgeschwindigkeit: $a_0 = \sqrt{\gamma R T_0}$

$$\therefore \frac{F}{\dot{m} \cdot a_0} = (1 + f) \frac{u_e}{a_0} - \frac{u_0}{a_0}$$

- Zusammen mit der Definition der Machzahl $M = u/a$ ergibt sich die spezifische Schubkraft



$$\frac{F}{\dot{m} \cdot a_0} = (1 + f) M_e \sqrt{\frac{T_e}{T_0}} - M_0$$

- Da $f \ll 1$ folgt:

$$\frac{F}{\dot{m} \cdot a_0} \cong M_e \sqrt{\frac{T_e}{T_0}} - M_0$$

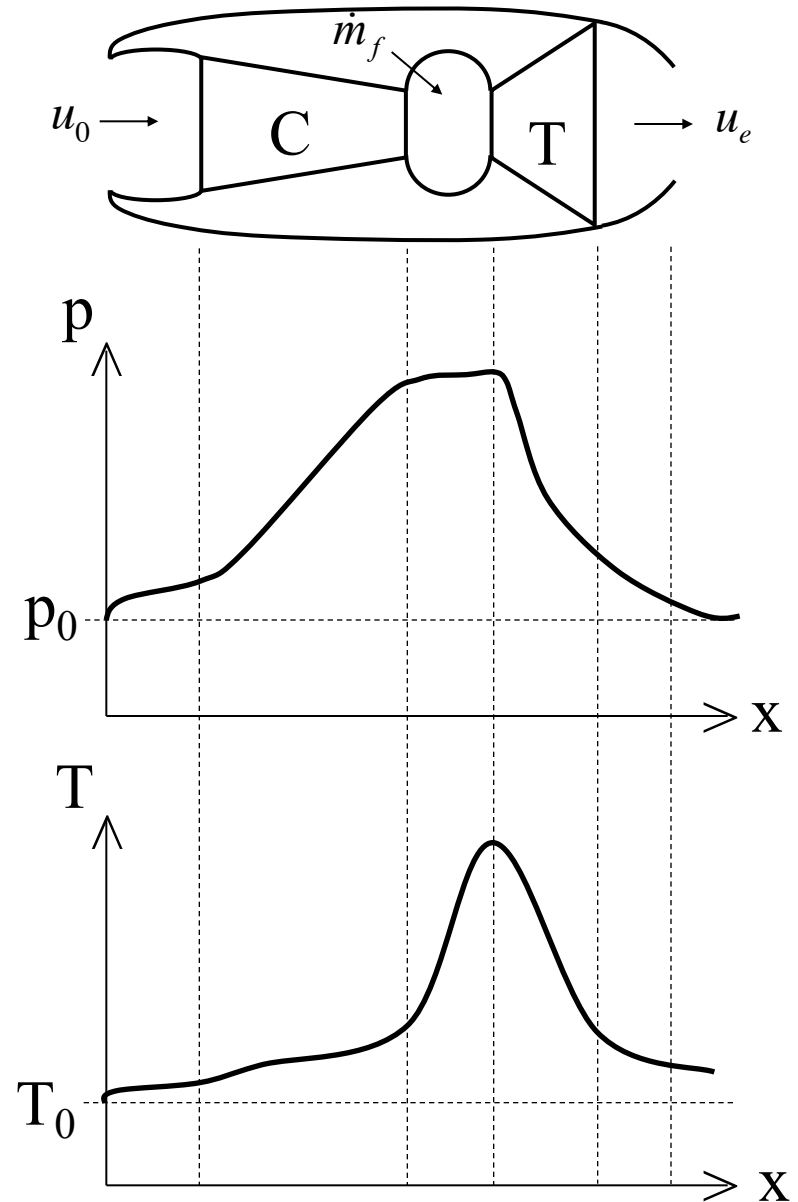
- Wobei:
 - M_0 = Flug-Machzahl (ca. 0.85)
 - M_e = Austritts-Machzahl (ca. 1)
 - T_0 = Umgebungstemperatur
 - T_e = Austrittstemperatur
- Heisses Austrittsgas bei hoher Geschwindigkeit erzeugt Schub



- Gasturbinen werden hauptsächlich für zwei Anwendungen gebraucht:
 - Flugzeug-Triebwerke
 - Energie- und Wärmeerzeugung

- **1) Flugzeug-Triebwerke**

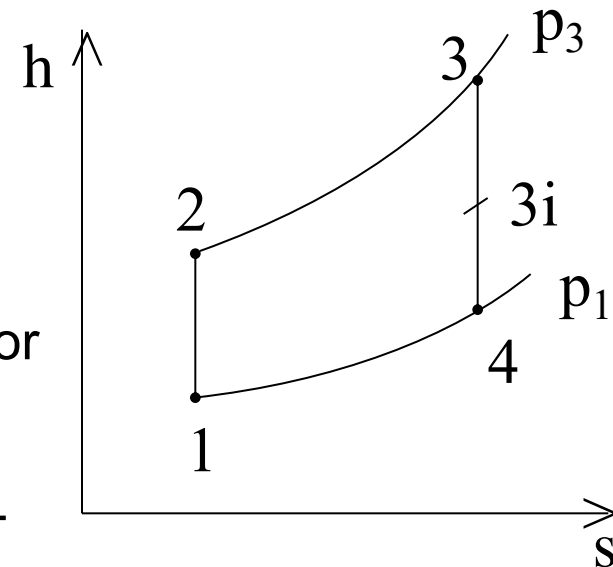
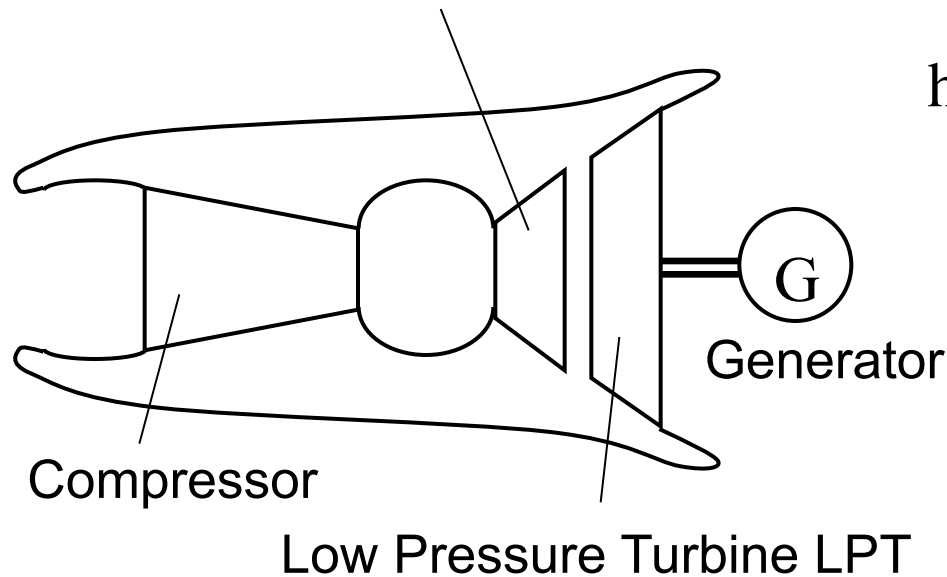
- Wandelt chemische Energie in kinetische Energie um
- Druck- und Temperaturverlauf durch das Triebwerk





- **2) Energie- und Wärmeerzeugung**
- Annahme: idealer Prozess, kinetische Terme vernachlässigt
- HPT treibt den Kompressor an
- LPT treibt den Generator an

High Pressure Turbine HPT





- Arbeit HPT = Arbeit für den Kompressor

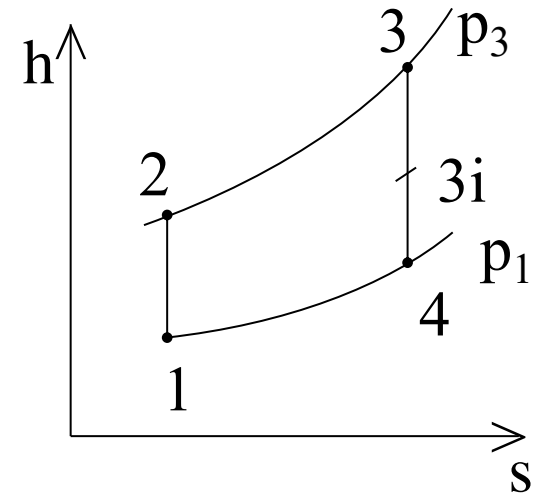
$$\therefore h_3 - h_{3i} = h_2 - h_1$$

$$h_{3i} = h_3 - h_2 + h_1$$

- Arbeit für den Generator = Arbeit LPT

$$\frac{W}{\dot{m}} = h_{3i} - h_4$$

$$\frac{W}{\dot{m}} = h_3 - h_2 + h_1 - h_4 = \underbrace{(h_3 - h_4)}_{\text{Expansionsarbeit}} - \underbrace{(h_2 - h_1)}_{\text{Kompressionsarbeit}}$$



Expansionsarbeit Kompressionsarbeit

- Für $c_p = \text{konstant}$ gilt: $h = c_p T$



„Aeroderivative“ Triebwerke zur Stromgewinnung

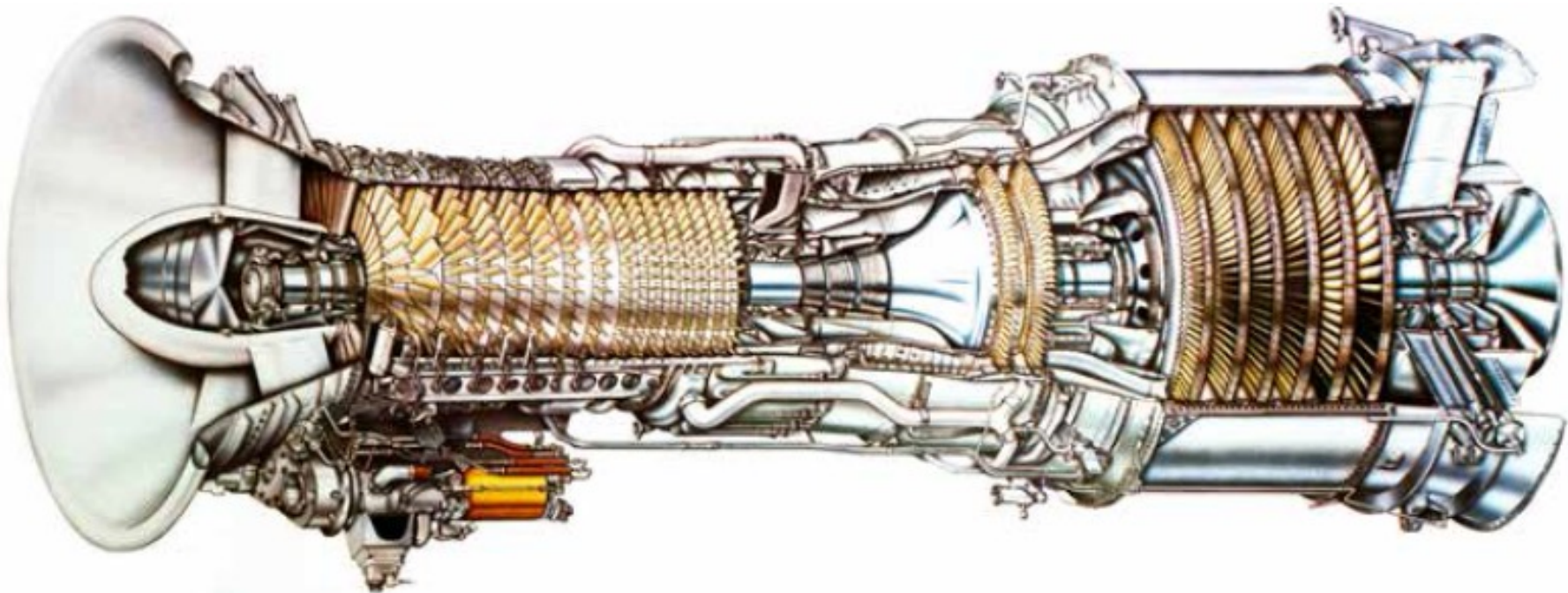
- Flugzeugtriebwerke sind für ein geringes Gewicht und schnelle Lastwechsel ausgelegt
- Das Design von Flugzeugtriebwerken hat Vorteile für die Stromgewinnung. Das führte zu den „Aeroderivative“ Triebwerken
- Anwendungen
 - auf See
 - Stromgewinnung auf See
 - Notstromversorgung
 - Krankenhäuser
 - Flughäfen
 - Industrieanwendungen wie Zementherstellung und in Minen
 - Pipelines und Raffinerien
 - Stromversorgungsunternehmen



GE Aeroderivative

GE LM2500

- Power: 33MW
- Efficiency: 39%
- Turbine Speed: 3'600 rpm (angepasst an 60 Hz Netzfrequenz und 2 Pol Generator)
- Pressure ratio: 23
- TAT: 524°C
- Fuels: LNG or Marine Gas Oil (MGO)

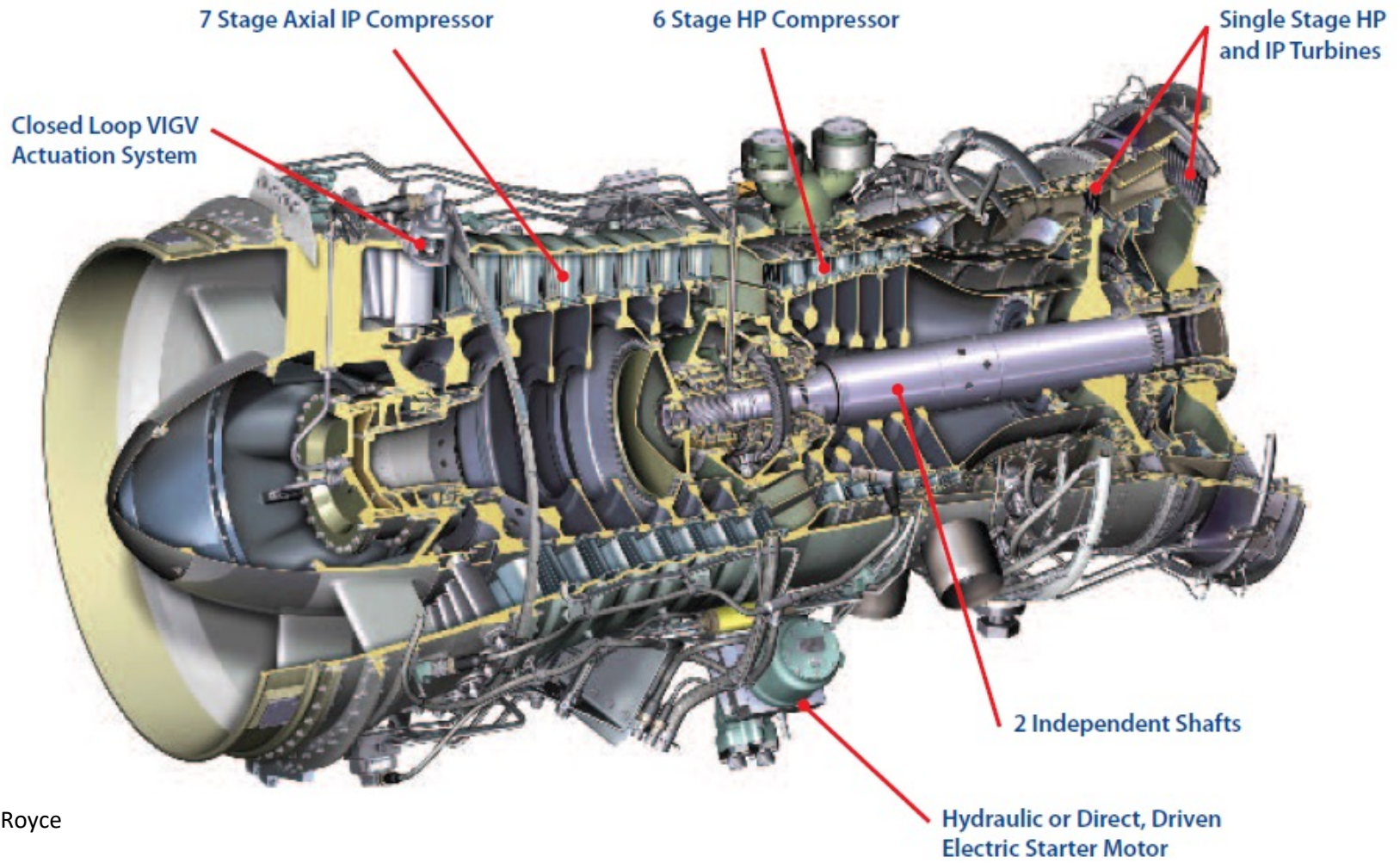




Rolls Royce Aero derivative

Rolls-Royce RB211

- Power: 32MW; efficiency: 39%
- Turbine Speed: 4'850 rpm
- Pressure ratio: 23
- Fuels: Natural gas, oil or duel operaton

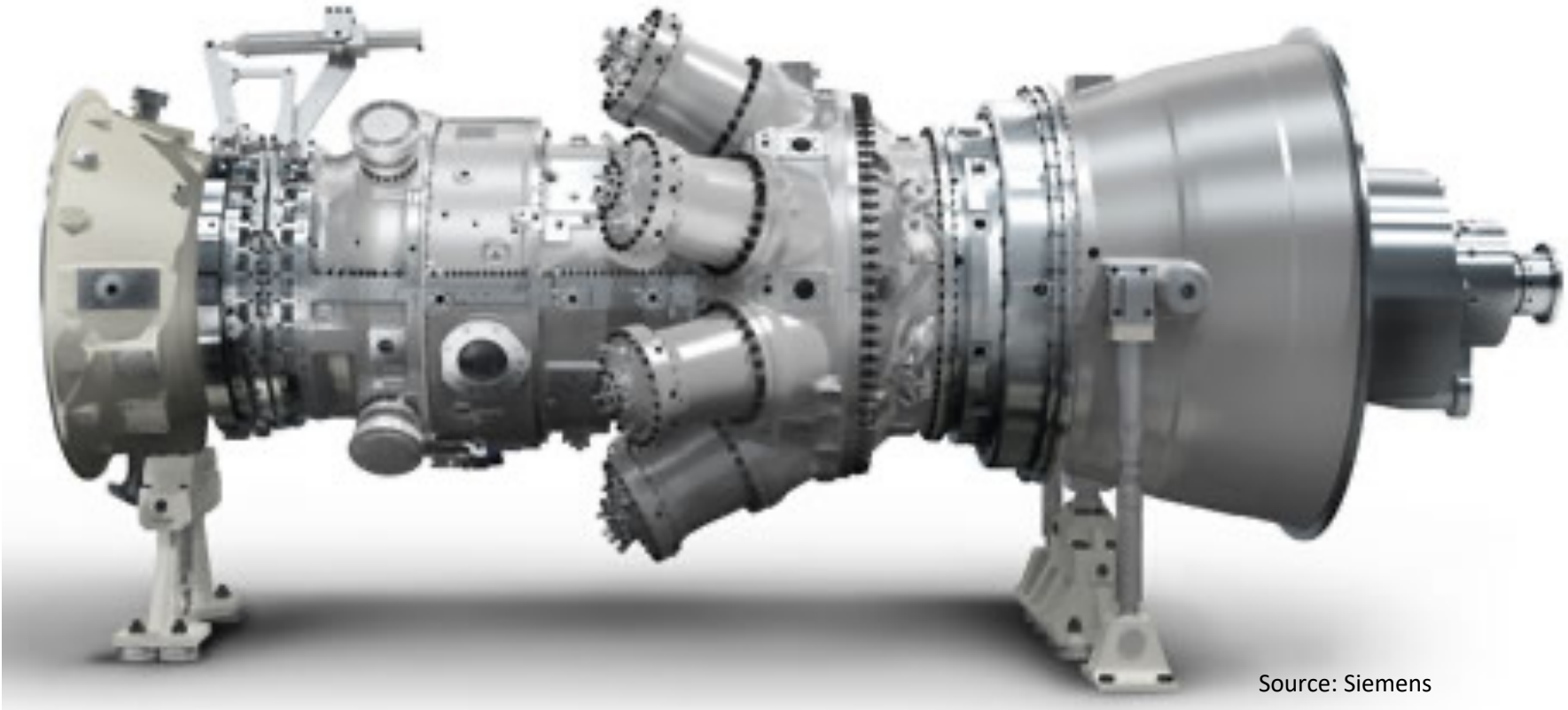




Siemens Gas Turbine on Basis of Aeroderivates

Siemens SGT-750

- Power: 37MW
- Efficiency: 39.5%
- Turbine Speed: 6'100 rpm
- Pressure ratio: 23.8
- TAT: 459°C
- Fuels: Natural gas, oil



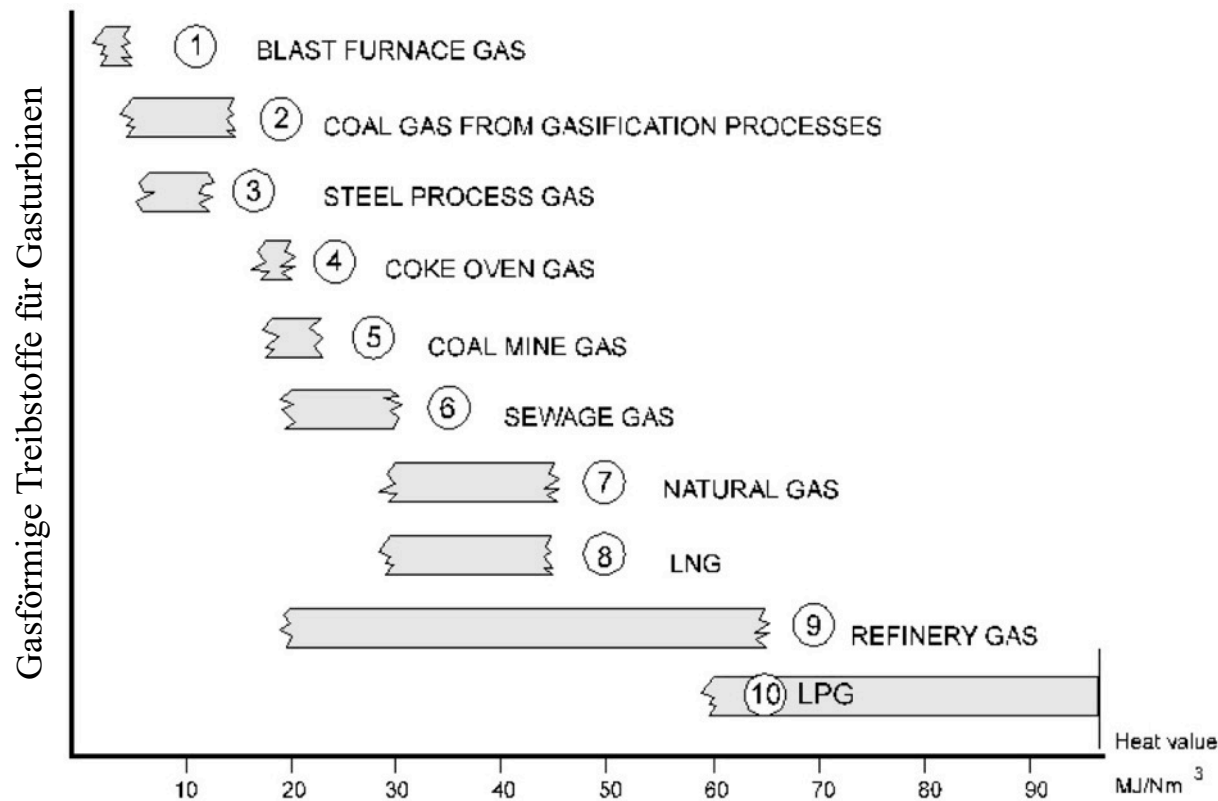
Source: Siemens



Treibstoffflexibilität von Gasturbinen

Eine Gasturbine mit Treibstoffflexibilität kann verschiedene gasförmige und flüssige Treibstoffe verschiedener Zusammensetzung und Heizwerte verbrennen

- Dualer Treibstoffbetrieb: Betrieb mit Erdgas und Schweröl
- Der Betriebsbereich der Gasturbine kann für verschiedene Heizwerte angepasst werden
- Weitere Treibstoffe : Röhol, "Syngas"



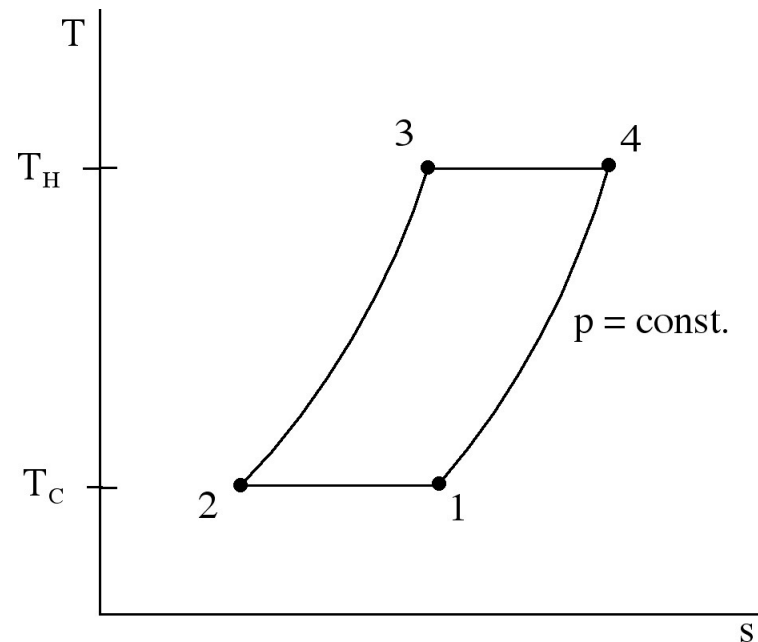
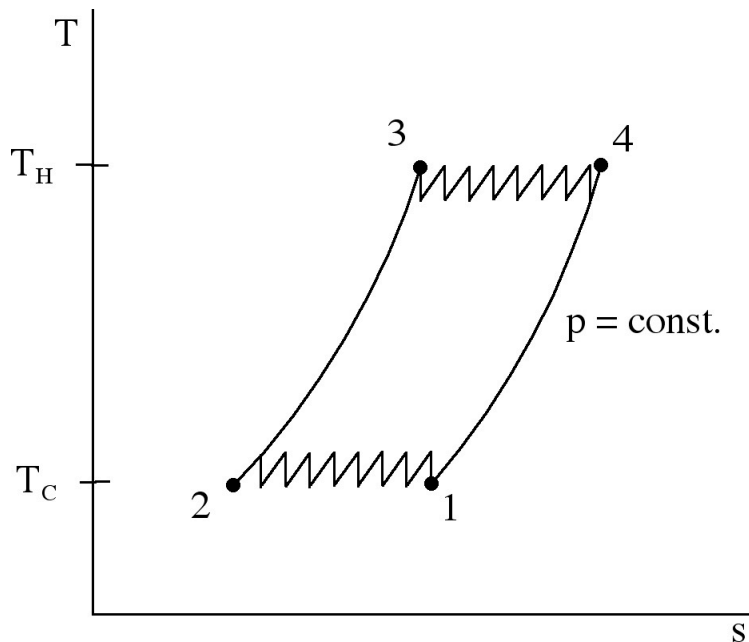


4.3 Ericsson Zyklus

- Steigerungen im Wirkungsgrad werden erreicht durch:
 - Zwischenkühlung
 - Zwischenüberhitzung
 - Regeneration
- Normalerweise werden nicht mehr als 2 bis 3 Stufen für Zwischenkühlung und Überhitzung verwendet
- Annahme: unendliche Anzahl von Stufen



- Idealer regenerativer Gasturbinen-Prozess
- Zwischenkühlung immer auf T_C , Überhitzung auf T_H
- 100% Regeneration, d.h. abgegebene Wärme 4-1 wird für Erhitzung 2-3 verwendet. Gesamte externe Wärmezufuhr erfolgt in den Zwischenüberhitzern, Wärmeabfuhr in den Zwischenkühlern





- Wärme Zu- und Abfuhr erfolgt dann bei T_H und T_C
- Wirkungsgrad:

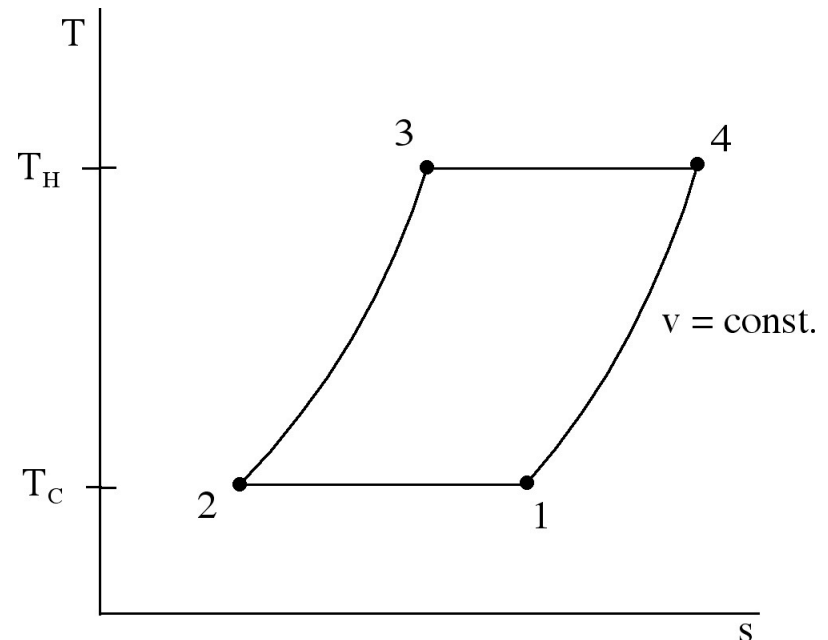
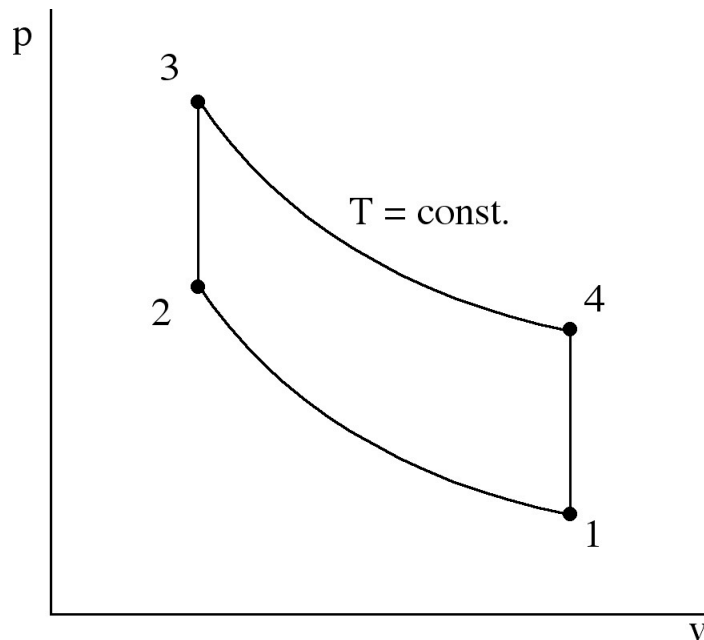
$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

- Gleicher Wirkungsgrad wie Carnot-Prozess



4.4 Stirling Zyklus

- Besteht aus
 - Isotherme Kompression bei T_C
 - Isochore Wärmezufuhr
 - Isotherme Expansion bei T_H
 - Isochore Wärmeabfuhr
- Gleicher Wirkungsgrad wie Carnot- und Ericsson Zyklus





- Wärme wird dem Arbeitsgas von aussen zugeführt: *external* combustion engine
- Beispiel eines Stirling-Motors:
 - kleiner Kolben: Arbeitskolben
 - grosser Kolben: Verdrängerkolben

