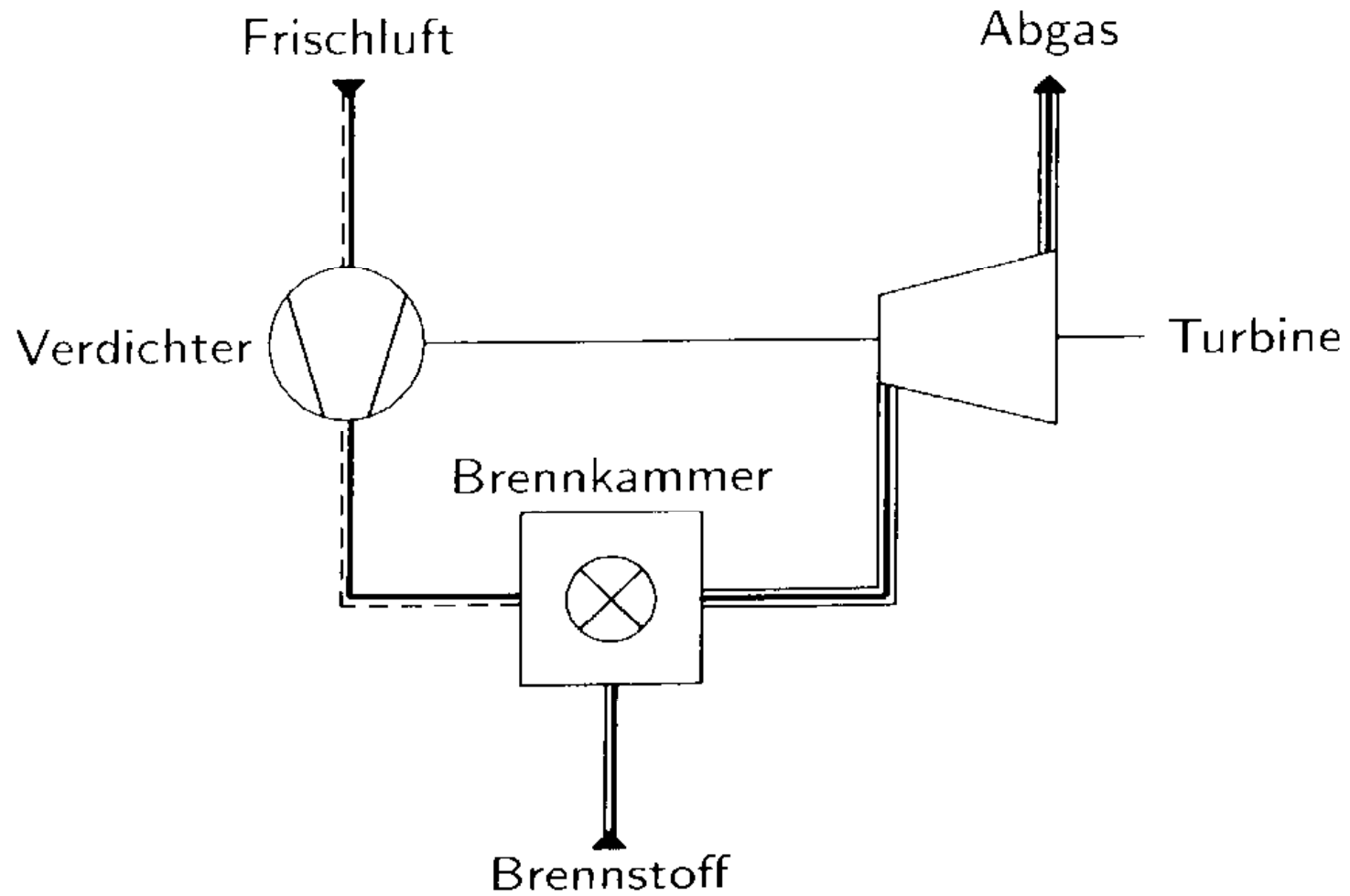
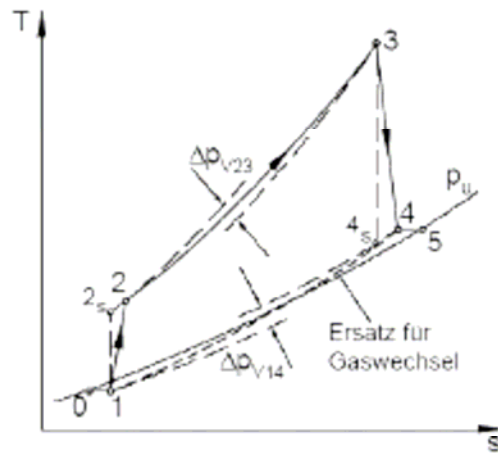


Energietechnik

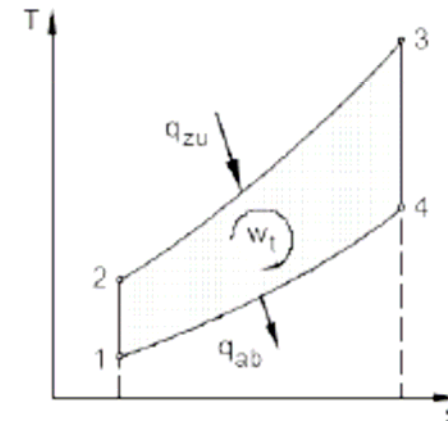
Gasturbinenprozess, Kombinationsprozesse



Einfacher Gasturbinenprozess

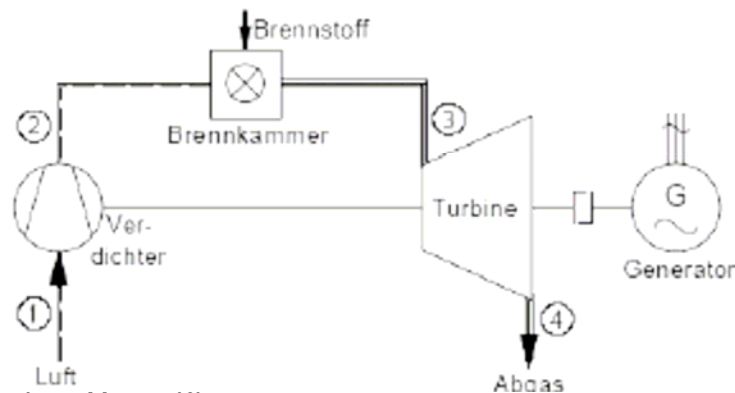


realer

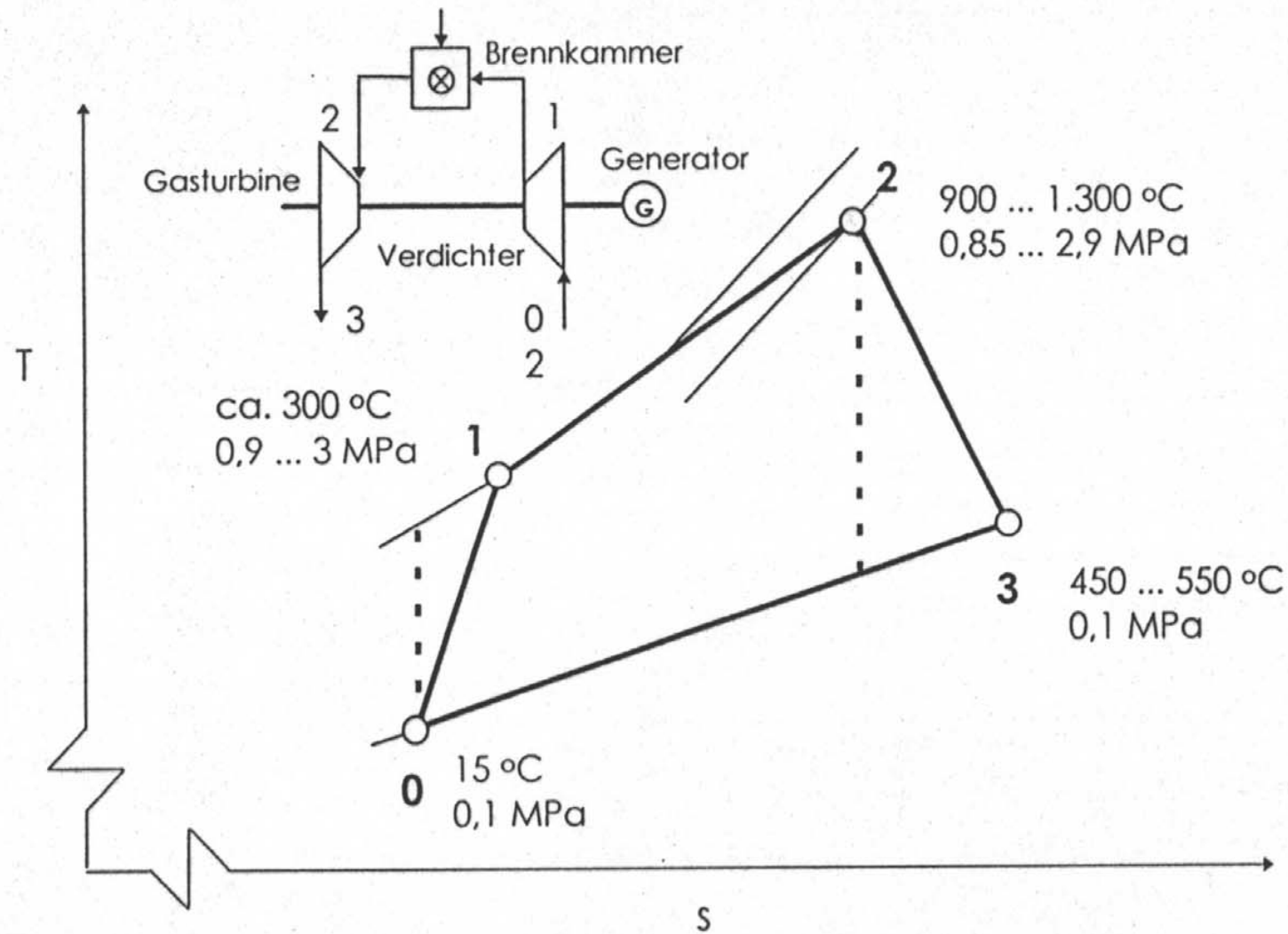


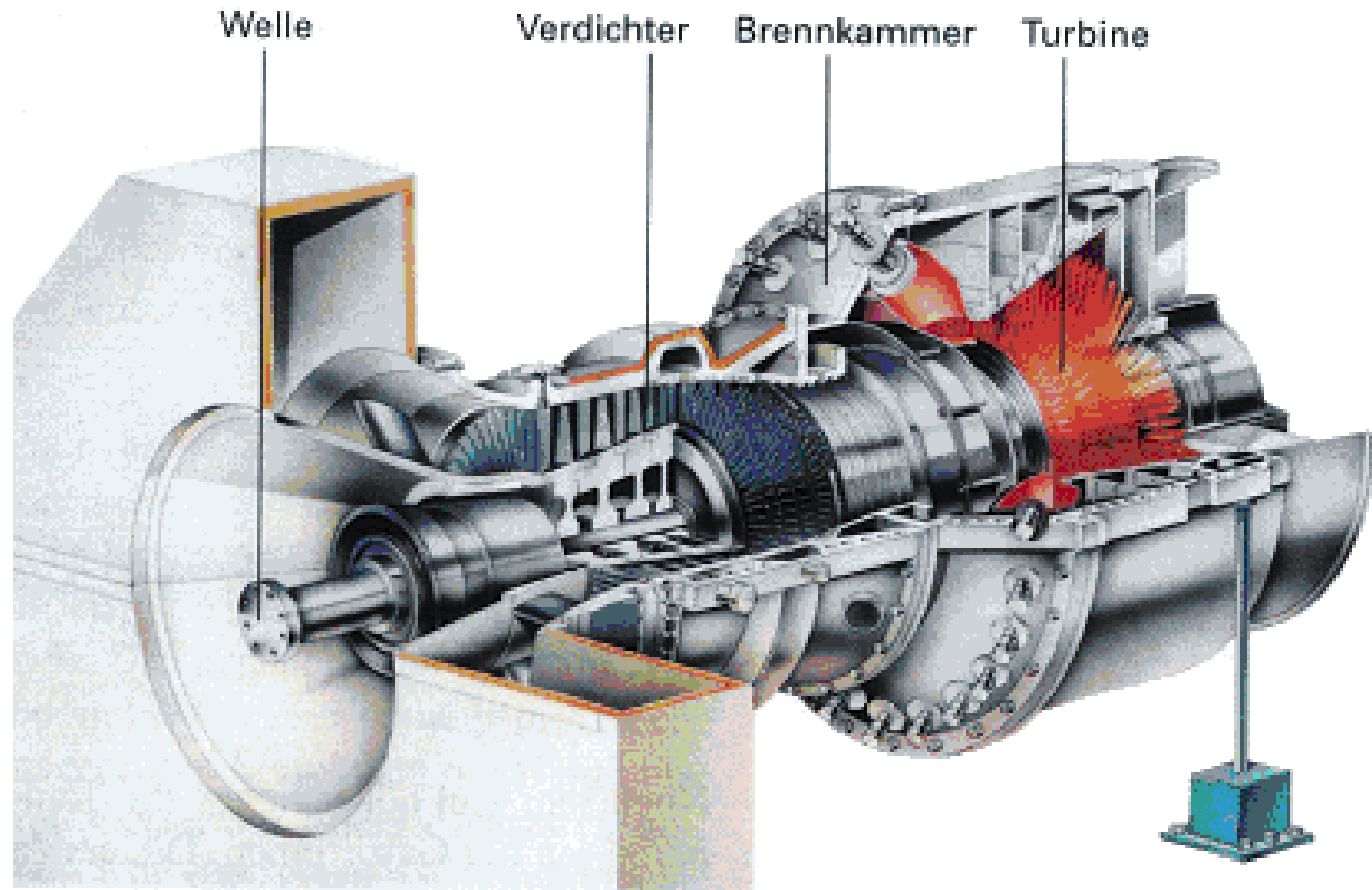
idealer

Joule-Prozess

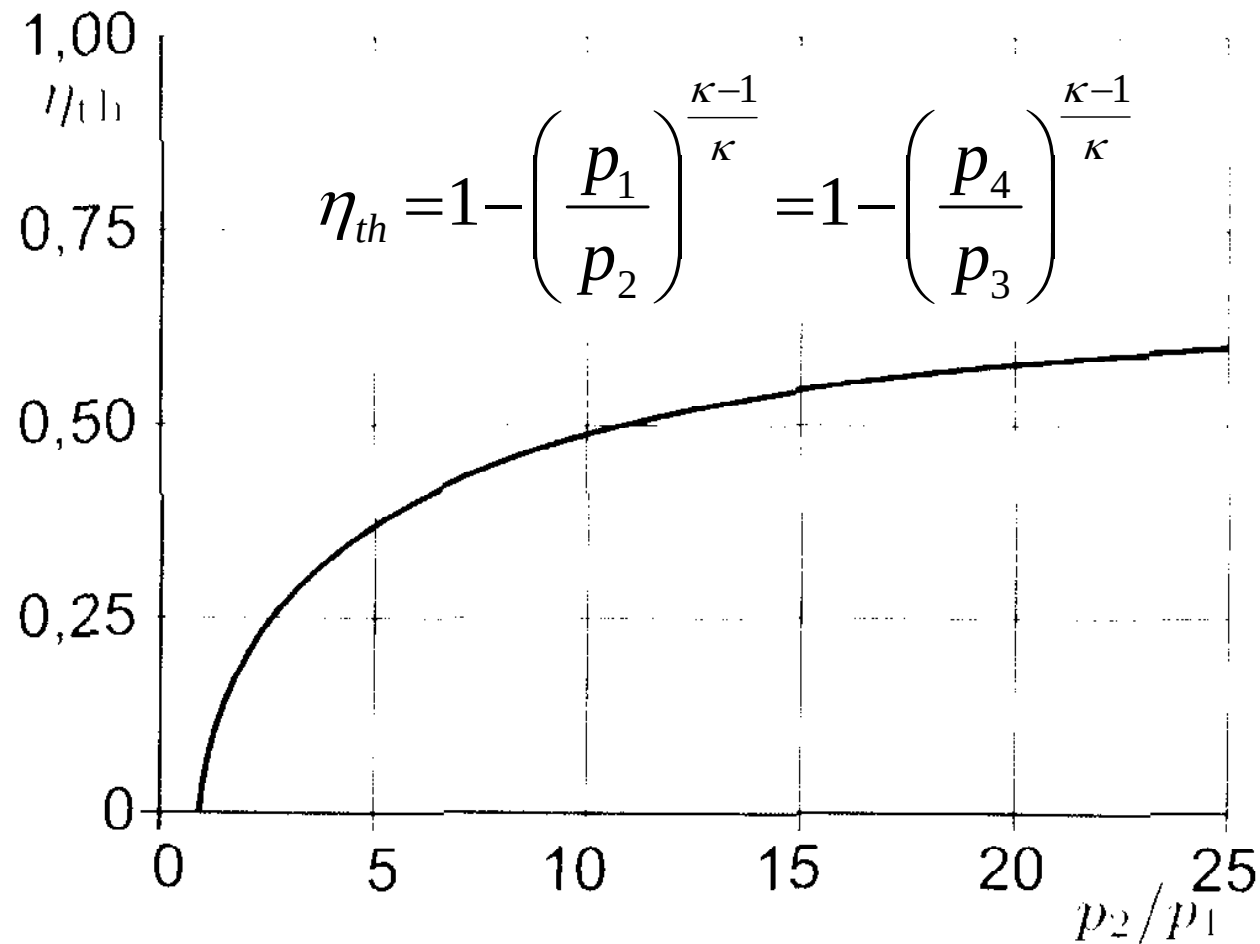


- 1 - 2: isentrope Verdichtung;
- 2 - 3: isobare Wärmezufuhr;
- 3 - 4: isentrope Expansion;
- 4 - 1: isobare Wärmeabfuhr (Gaswechsel).





- **Verdichter (Kompressor) saugt Luft an, verdichtet sie und führt sie der Brennkammer zu.**
- **dort wird eingespritzter Brennstoff unter nahezu konstantem Druck verbrannt**
- **es entstehen Verbrennungsgase mit einer Temperatur von bis zu 1500 °C**
- **die heißen Verbrennungsgase strömen mit hoher Geschwindigkeit in die Turbine**
- **Turbine wird durch Verbrennungsgase in Drehung versetzt (Strömungsenergie → mech. Energie)**
- **ein Teil der mech. Energie dient Antrieb des Verdichters, Rest ist nutzbare Energie (Stromerz.)**

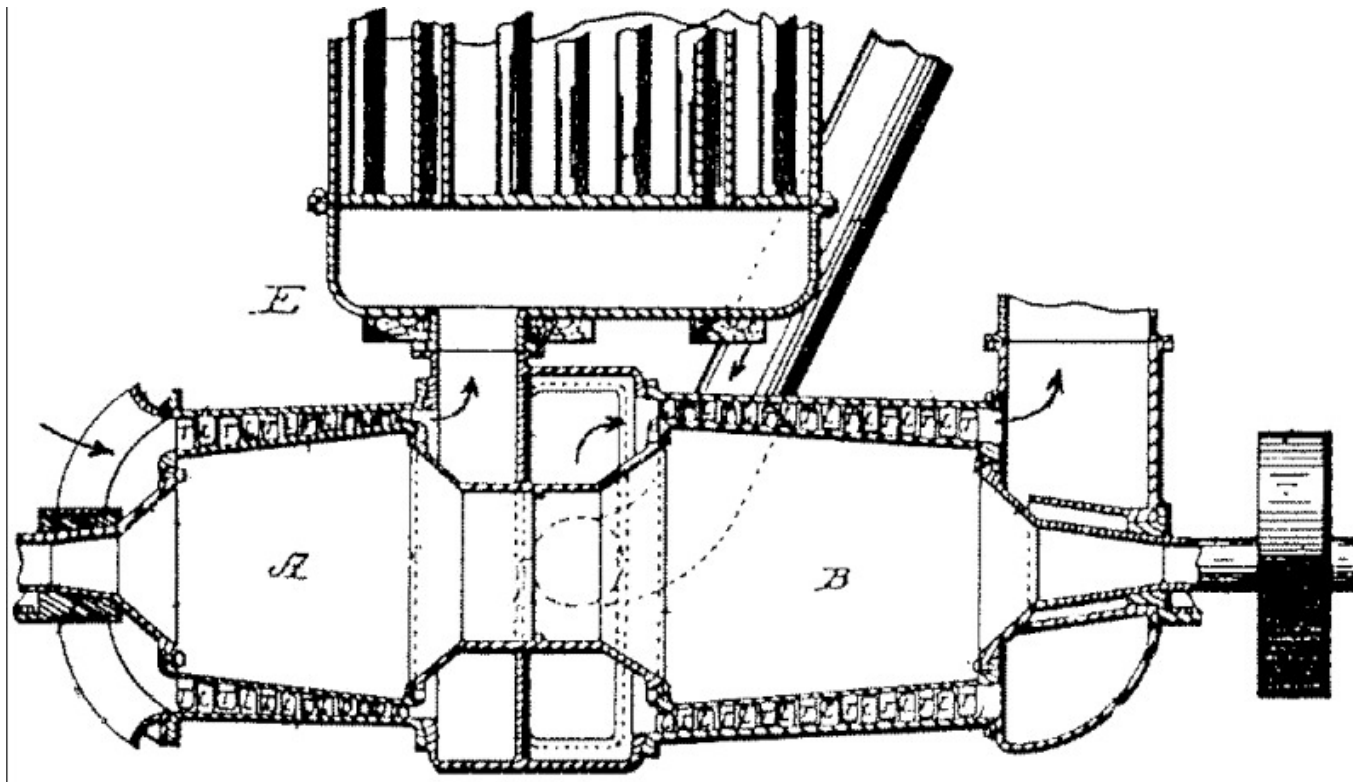


[Strauß, K.]

Wirkungsgrad des idealen Joule-Prozesses

1930er und 1940er Jahre

Entwicklung der Gasturbine zur Serienreife (Fa. BBC)

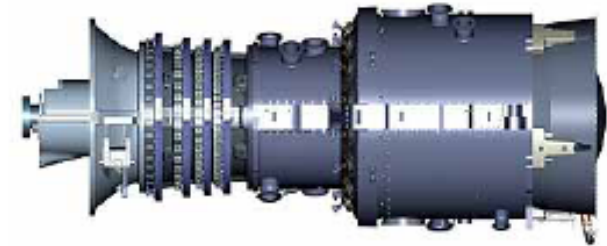


1897 erfunden von Franz Stolze in Berlin

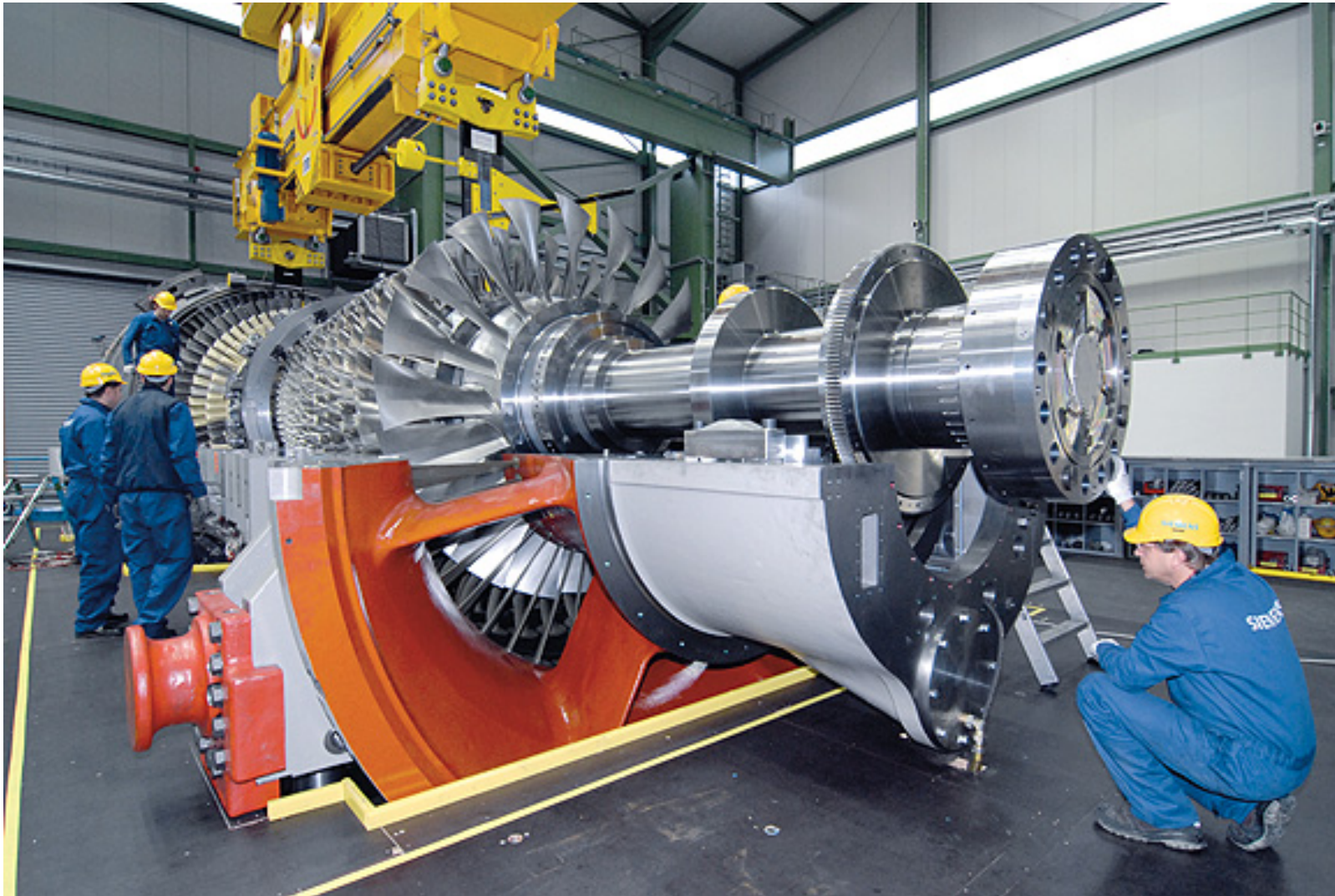
	ABB	GE/EGT	GE	GE	EGT	RR	Siemens	Westinghouse
Modell	GT24/ GT26	7FA/9FA	9G/9H	LM6000	Cyclone	Trent	V84.3A/ V94.3A	501G/ 701G
Technologie	(F)	F	G/H	Aeroderivat	F	Aeroderivat	F	G
Leistung in MW	165/ 240	159/ 226	282/ –	40,5	12,9	51,2	170/ 240	230/ 310
Leistung GUD in MW	250/ 365	241/ 348	420/ 480	–	–	–	254/ 359	345/ 465
Wirkungsgrad in %	37,5/ 37,8	35,9/ 35,7	39,5/ –	38,9	33,7	41,5	38,0	38,5
Wirkungsgrad GUD in %	58,1/ 58,5	54,6/ 55,1	58/ 60	–	–	–	57,9/ 58,1	58,0
Druckverhältnis	30	15	23	30	16	35	16,0	19,2
Temperatur vor Turbine in °C	1 235	1 288	1 430	–	1 250	–	1 310	1 427
Abgasstrom in kg/s	376/ 542	427/ 614	700/ 700	124,6	39,3	58,9	454/ 640	554/ 780
Abgastemperatur in °C	610	589	–	463	579	428	562	593

Weltweit leistungsstärkste Gasturbine

Neue Gasturbine (SGT5-8000H) arbeitet bei besonders hohen Temperaturen. An der ersten Turbinenschaufel erreichen sie über $1.500\text{ }^{\circ}\text{C}$, nahe dem Schmelzpunkt von Eisen. Dazu wurden neue, hochtemperatur-beständige und hochfeste Materialien entwickelt. Eine einzige der über 250 Turbinenschaufeln muss so viel Leistung wie 10 Sportwagen vermitteln und dabei Fliehkraftbelastungen vom 10fachen des Eigengewichtes aushalten. Daher sind sie aus einkristallinen, keramisch beschichteten Superlegierungen gefertigt.



Gasturbine SGT5-8000H	
Brennstoff	Gas, Öl
Leistung	340 MW
Wirkungsgrad	39 %
Gewicht	444 t
Länge	13,2 m
Höhe	5 m
Breite	5,2 m



[Siemens AG]

Siemens Gas Turbine

Gross Power Output (MW)	340 MW
Pressure ratio	19.2
Exhaust temperature (°C/°F)	625/1,157
Exhaust mass flow (kg/s)	820
Exhaust mass flow (lb/s)	1,808

Gas Turbine Emissions

NOx (ppm)	25
CO (ppm)	10

Gas Turbine Physical Dimensions

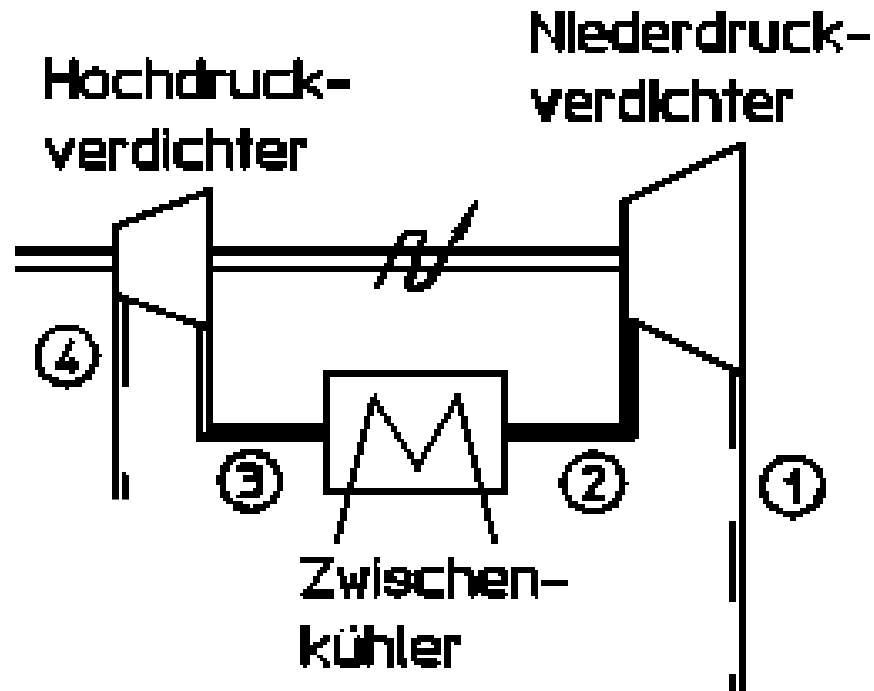
Weight (t)	440
Length (m)	13.2
Height (m)	5.0
Width (m)	5.0

Siemens Combined Cycle Power Plant

Single-Shaft	SCC5-8000H
Net power output (MW)	530
Net efficiency (%)	60
Net heat rate (kJ/kWh)	6,000
Net heat rate (Btu/kWh)	5,687

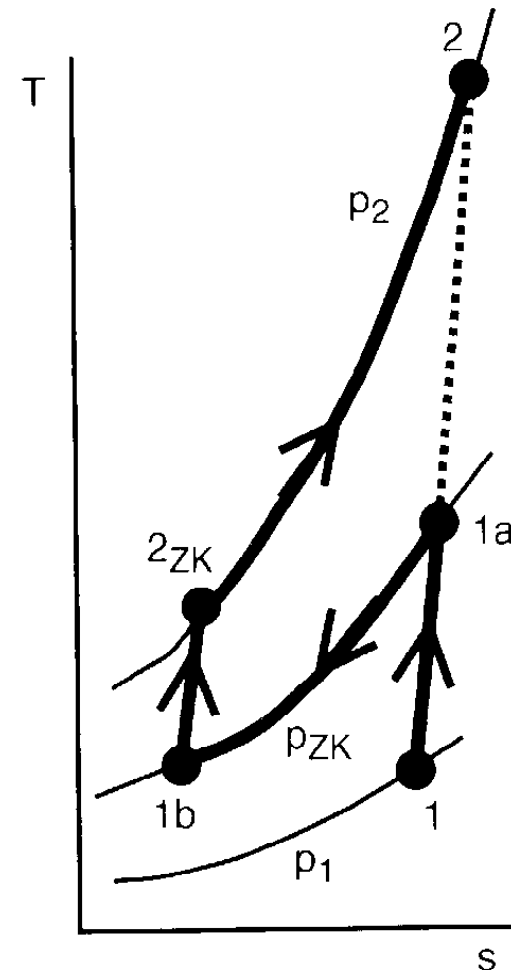
- Möglichkeiten zur Wirkungsgradsteigerung -

Zwischenkühlung: Abkühlung zwischen einzelnen Verdichterstufen – senkt die Verdichterarbeit

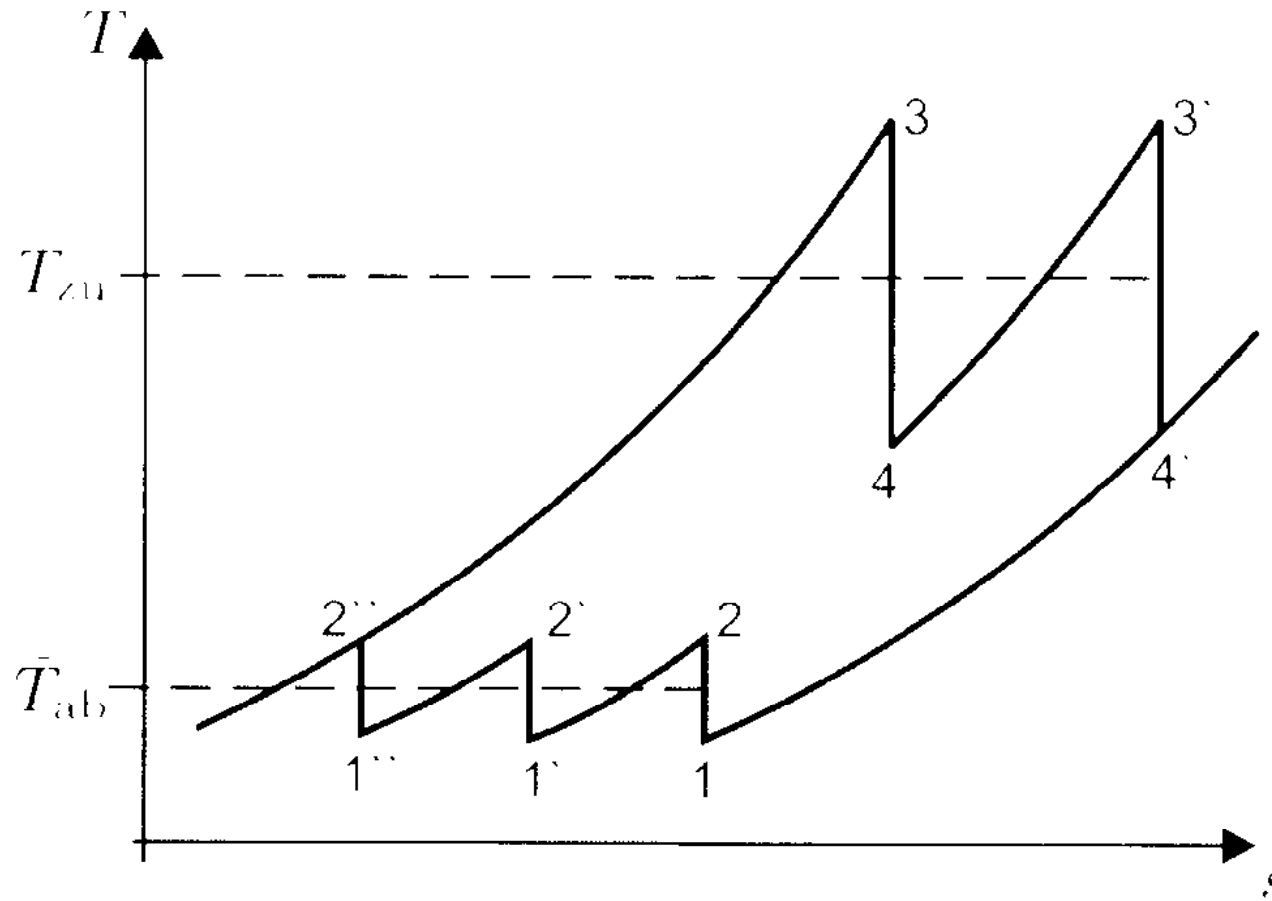


$$W_{\text{Verdichter}} = v_{\text{ein}} (p_2 - p_1)$$

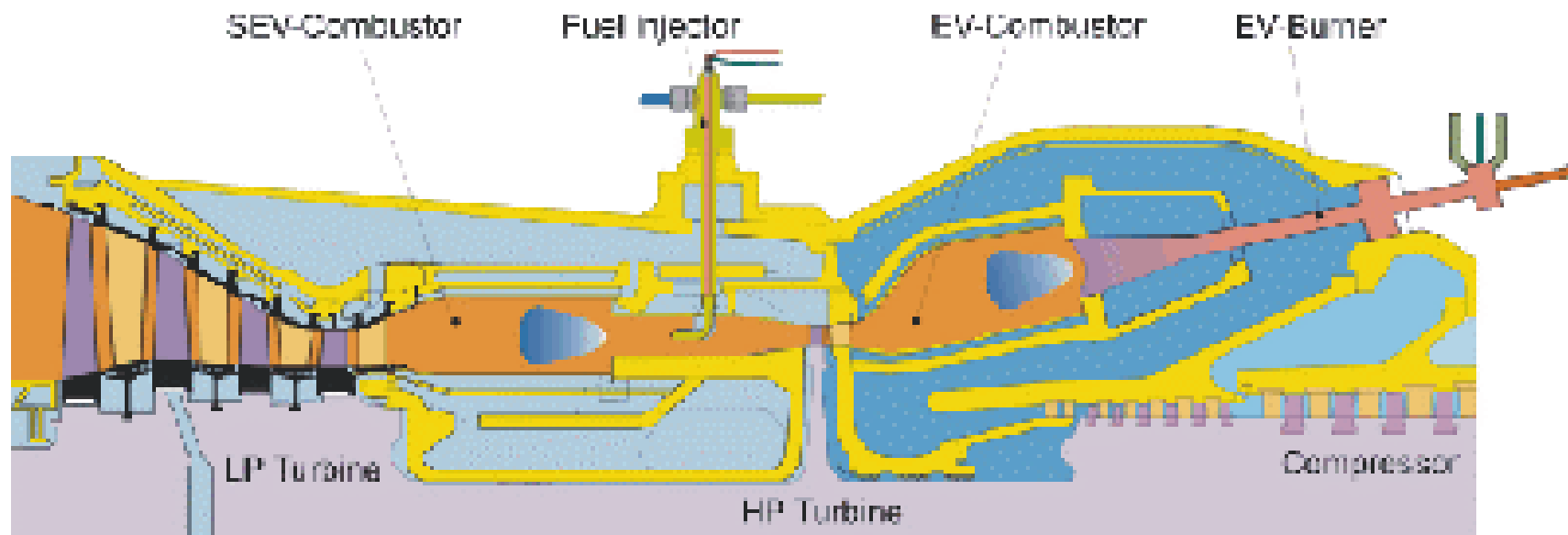
$$v_{\text{ein}} = f(t)$$



Zwischenerhitzung (Zwischenüberhitzung)

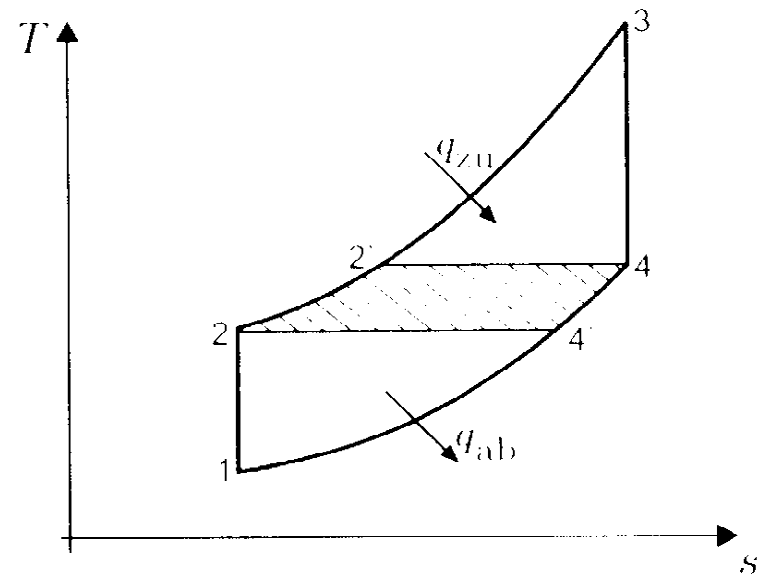
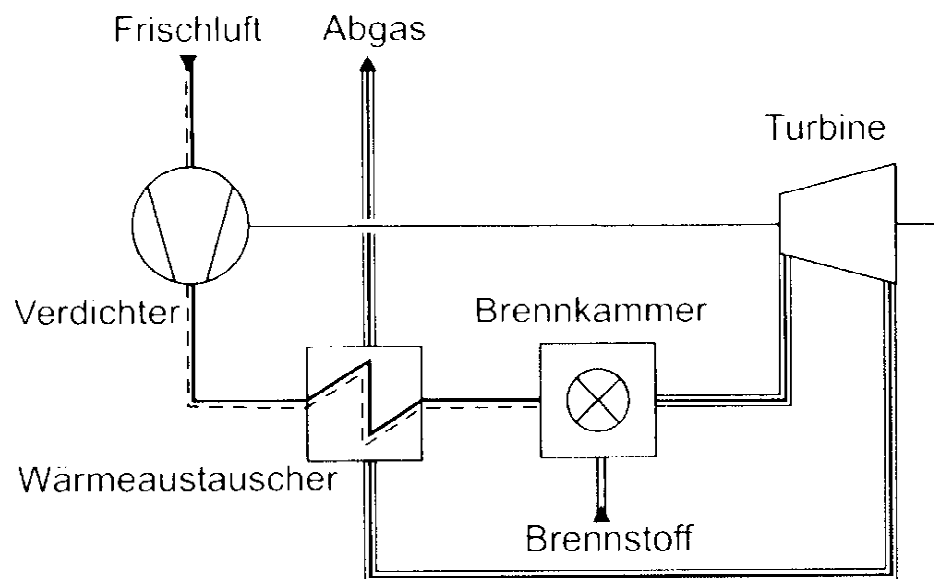


Gasturbine GT 26 mit Zwischenerhitzung



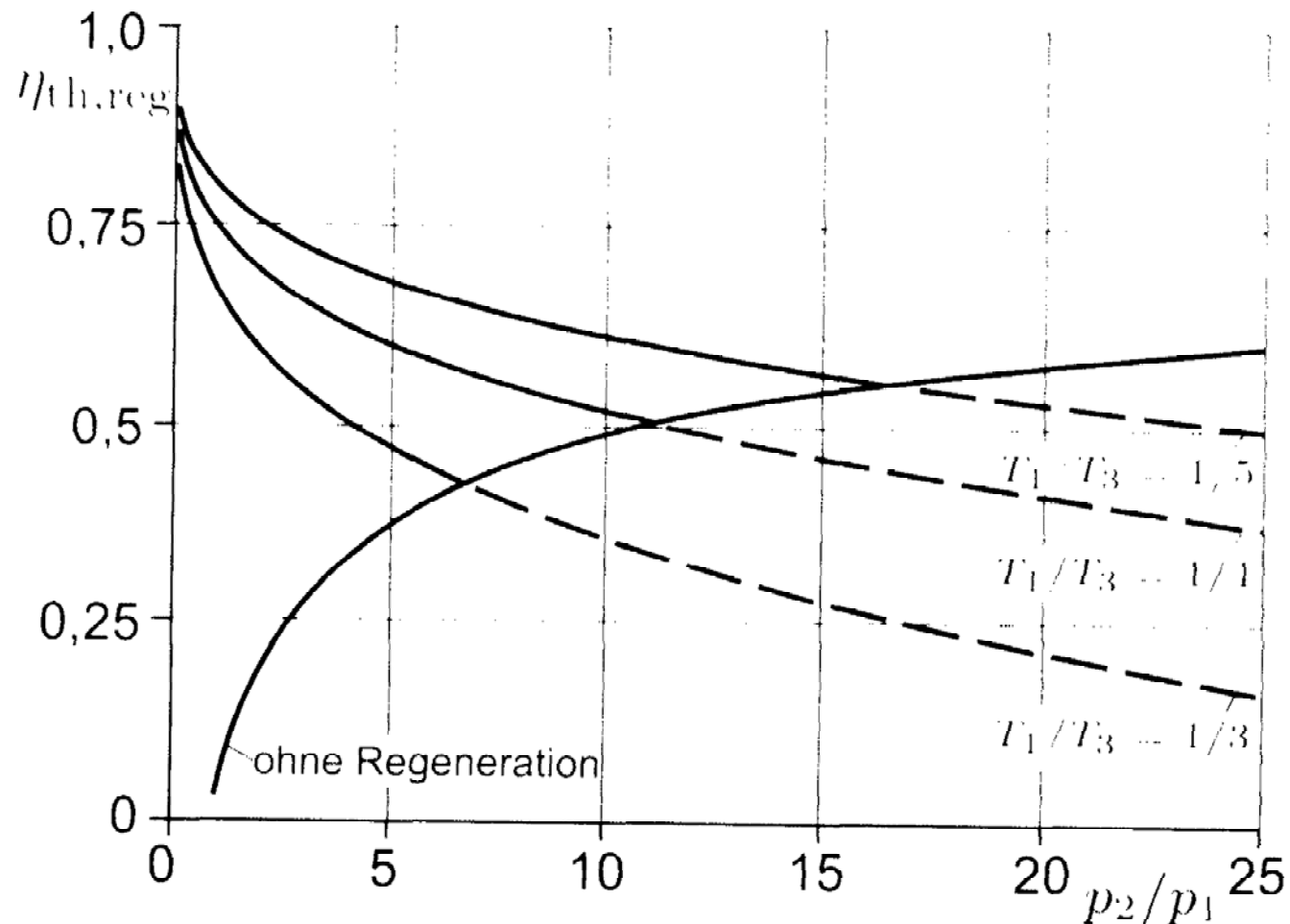
[www.alstom.de]

Gasturbinenprozess mit inneren Wärmeaustausch

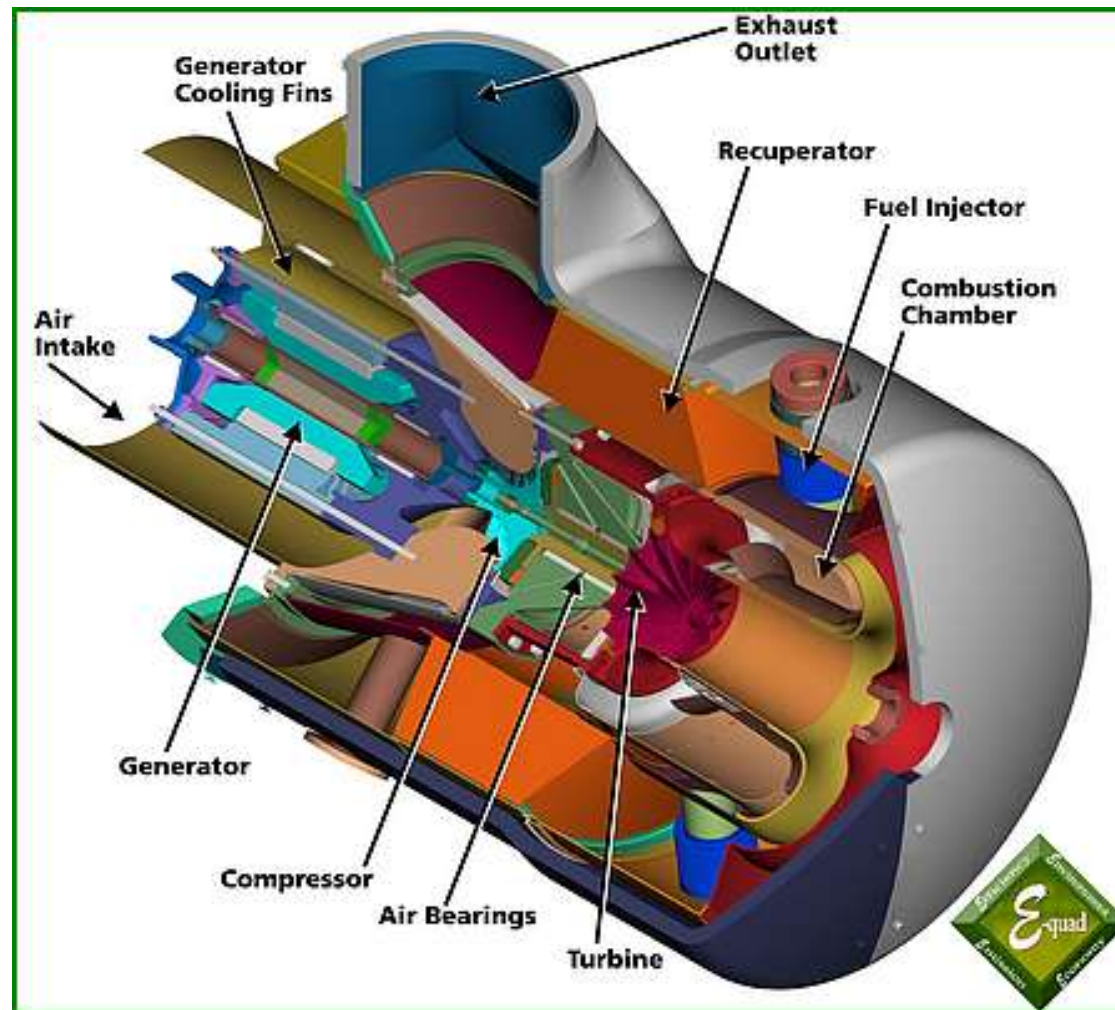


Merke: Nur die Verdichtete Luft darf vorgewärmt werden, die un- oder teilverdichtete Luft ist statt dessen zu kühlen (siehe Zwischenkühlung)

da: $w_{\text{Verdichter}} = v_{\text{ein}} (p_2 - p_1)$



Problem: nur für kleine Verdichtungsverhältnisse effektiv (z.B. Mikroturbinen)



Mikroturbine mit inneren Wärmeaustausch

- Kombinationskraftwerke -

Kombinierte Gas- und Dampfkraftwerksanlagen (GuD)

Das heutige Gasturbinenkraftwerk als

- zuverlässige und
- effektive Kraftwerksanlage

hat leider einen energietechnischen Mangel – die hohe Abgastemperatur mit $t_{\text{Abgas}} = 500 \text{ °C}$ erlaubt keine besseren Wirkungsgrade.

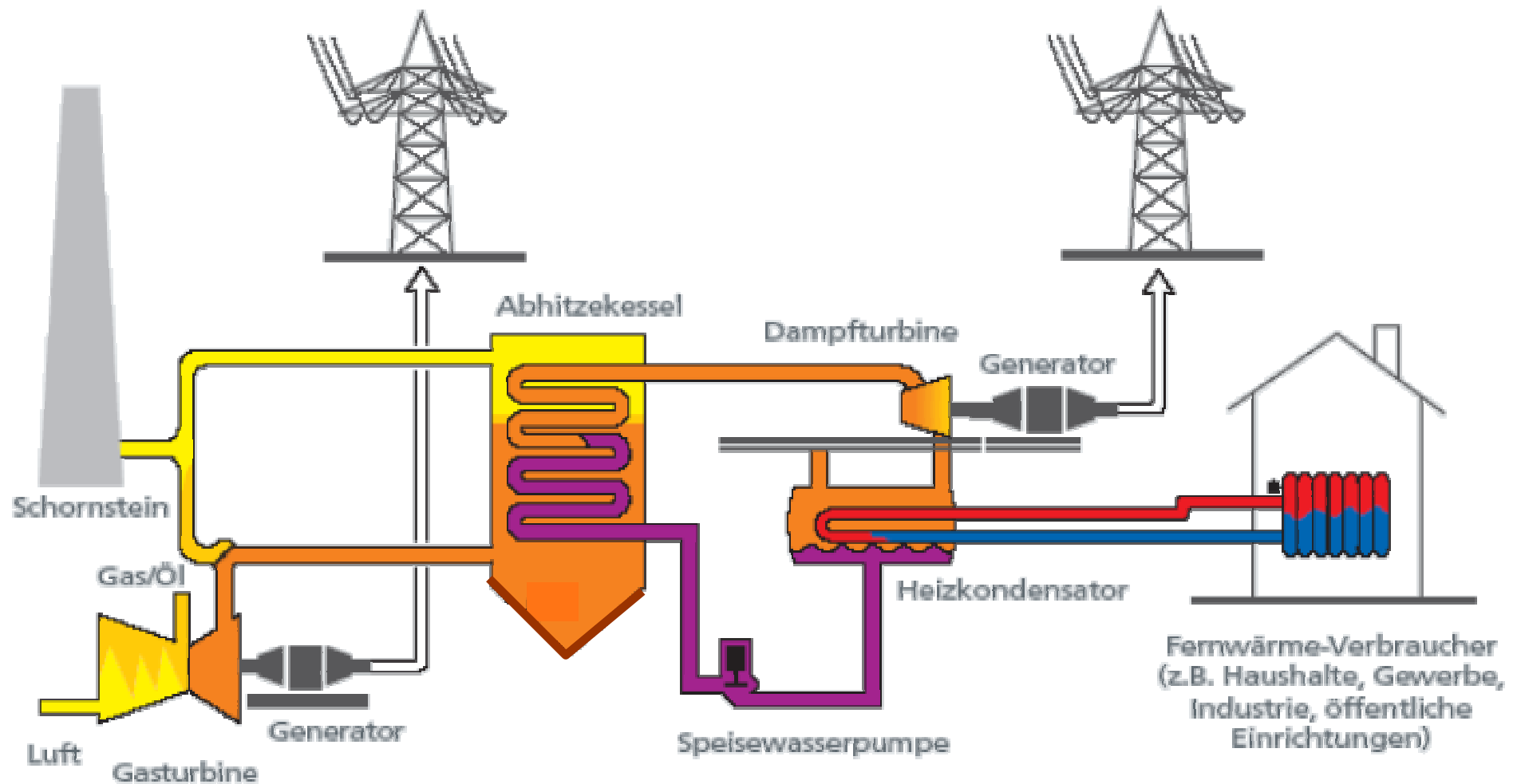
Die Nutzung dieser energetisch wertvollen Abwärme kann aber in einem nachgeschalteten Dampfprozess erfolgen, der seinerseits mit niedrigen Kondensations-temperaturen ($t_{\text{Kond.}} \approx t_{\text{Umgebung}}$) arbeitet.

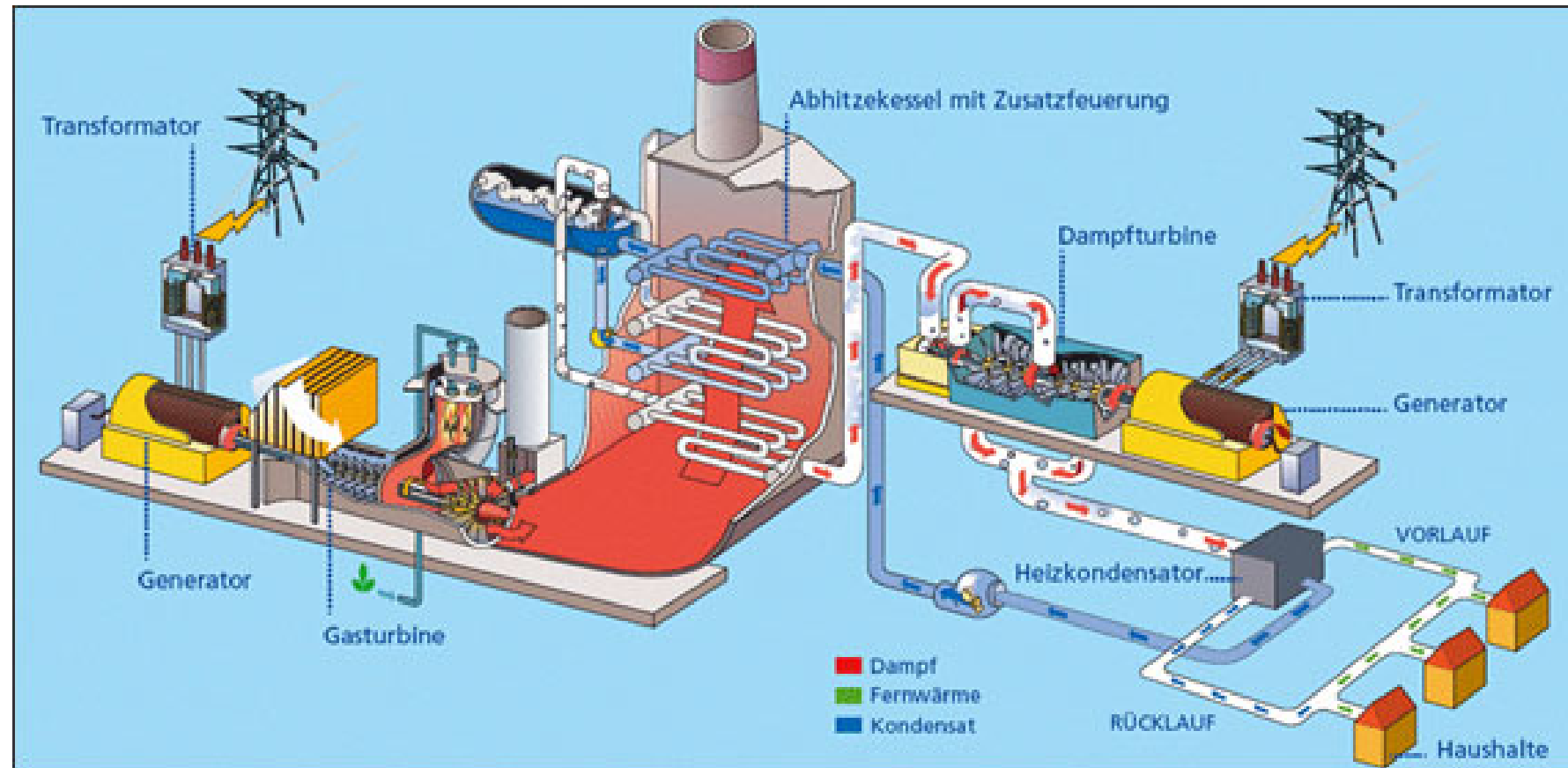
Eine solche Kopplung der

- hohen Prozesstemperatur der Wärmezufuhr der Gasturbine ($t_{\text{max zu}} > 1000 \text{ °C}$)
- und der niedrigeren Temperatur der Wärmeabfuhr ($t_{\text{min}} \approx 30 \text{ °C}$) im Dampfkraftprozess

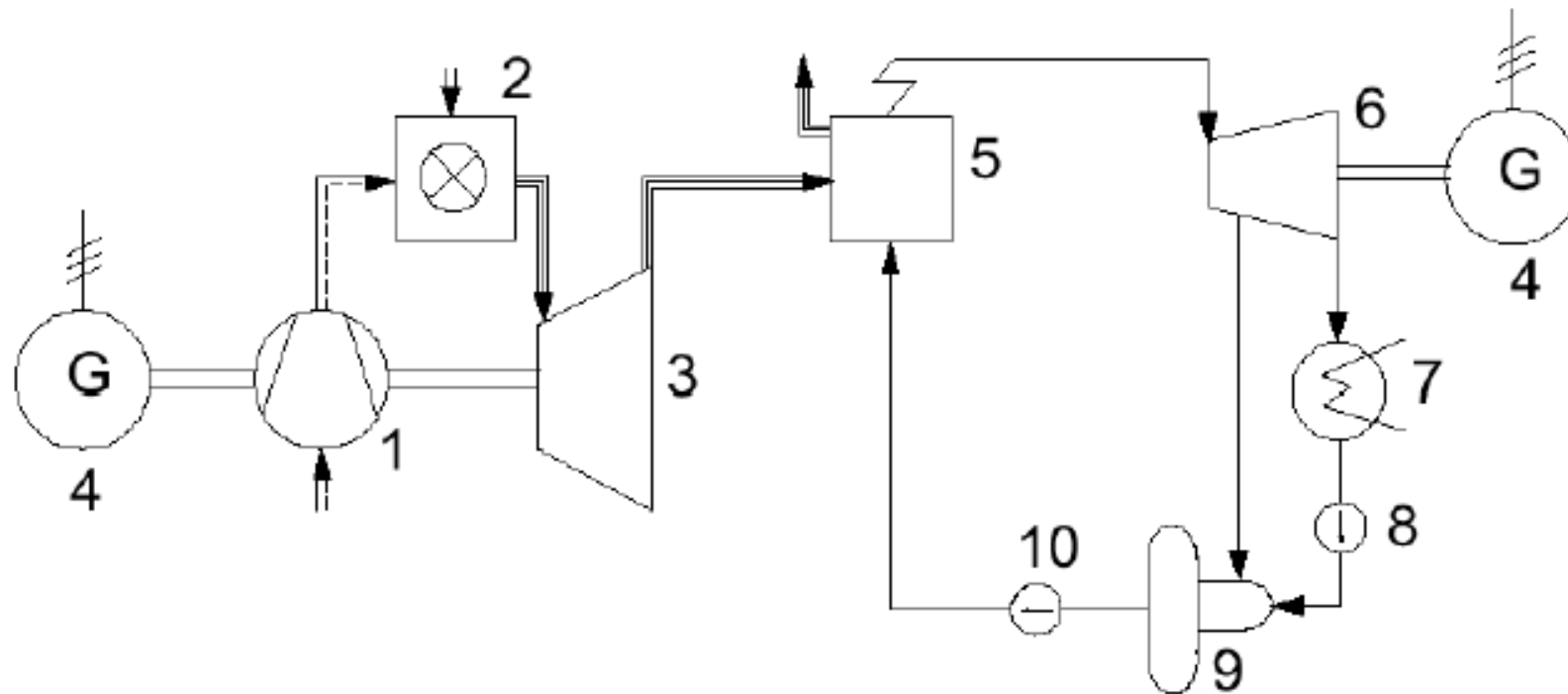
bietet hohe Wirkungsgrade beim GuD-Prozess (beachte $\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}}$).

Nutzung der Gasturbinenabwärme in GUD-Anlage





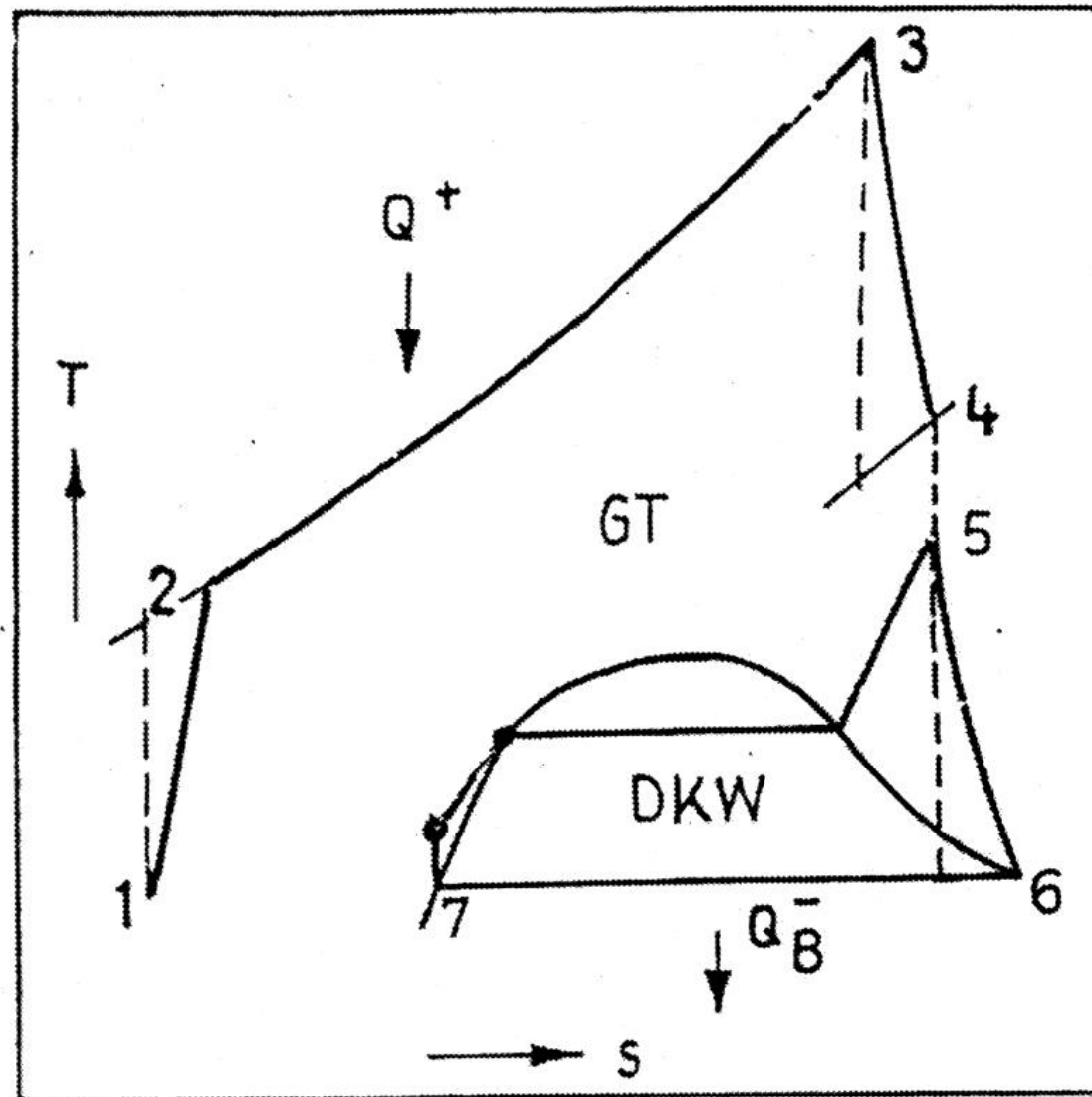
[www.electrabel.de]



1 Verdichter
2 Brennkammer
3 Turbine
4 Generator
5 Abhitzeessel

6 Dampfturbine
7 Kondensator
8 Kondensatpumpe
9 Entgaser
10 Speisepumpe

Gas- und Dampf- turbinen- Prozess



$$\eta_{\text{GuD}} = \frac{P_{\text{GT}} + P_{\text{DKW}}}{\dot{m}_{\text{Br}} \cdot H_u}$$

$$= \frac{\eta_{\text{GT}} \cdot \dot{m}_{\text{B}} \cdot H_u + \eta_{\text{DKW}} \cdot (1 - \eta_{\text{GT}}) \cdot \dot{m}_{\text{Br}} \cdot H_u}{\dot{m}_{\text{Br}} \cdot H_u}$$

$$\eta_{\text{GuD}} = \eta_{\text{GT}} + \eta_{\text{DKW}}(1 - \eta_{\text{GT}})$$

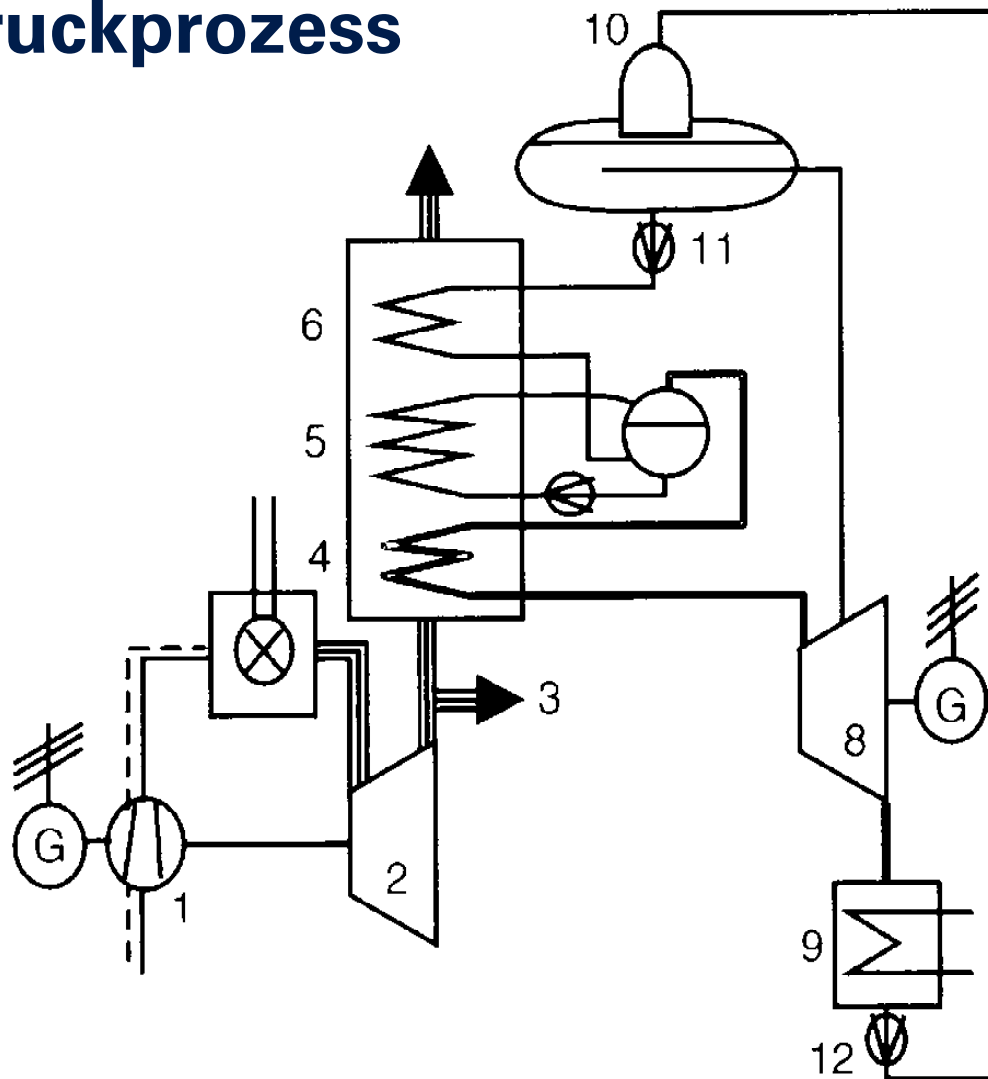
η_{GT}	η_{DKW}	η_{GuD}	
0,2	0,2	0,36	realisiert
0,3	0,2	0,44	realisiert
0,35	0,25	0,512	realisiert
(0,40)	0,30	0,58	neu

Abhitzeessel:

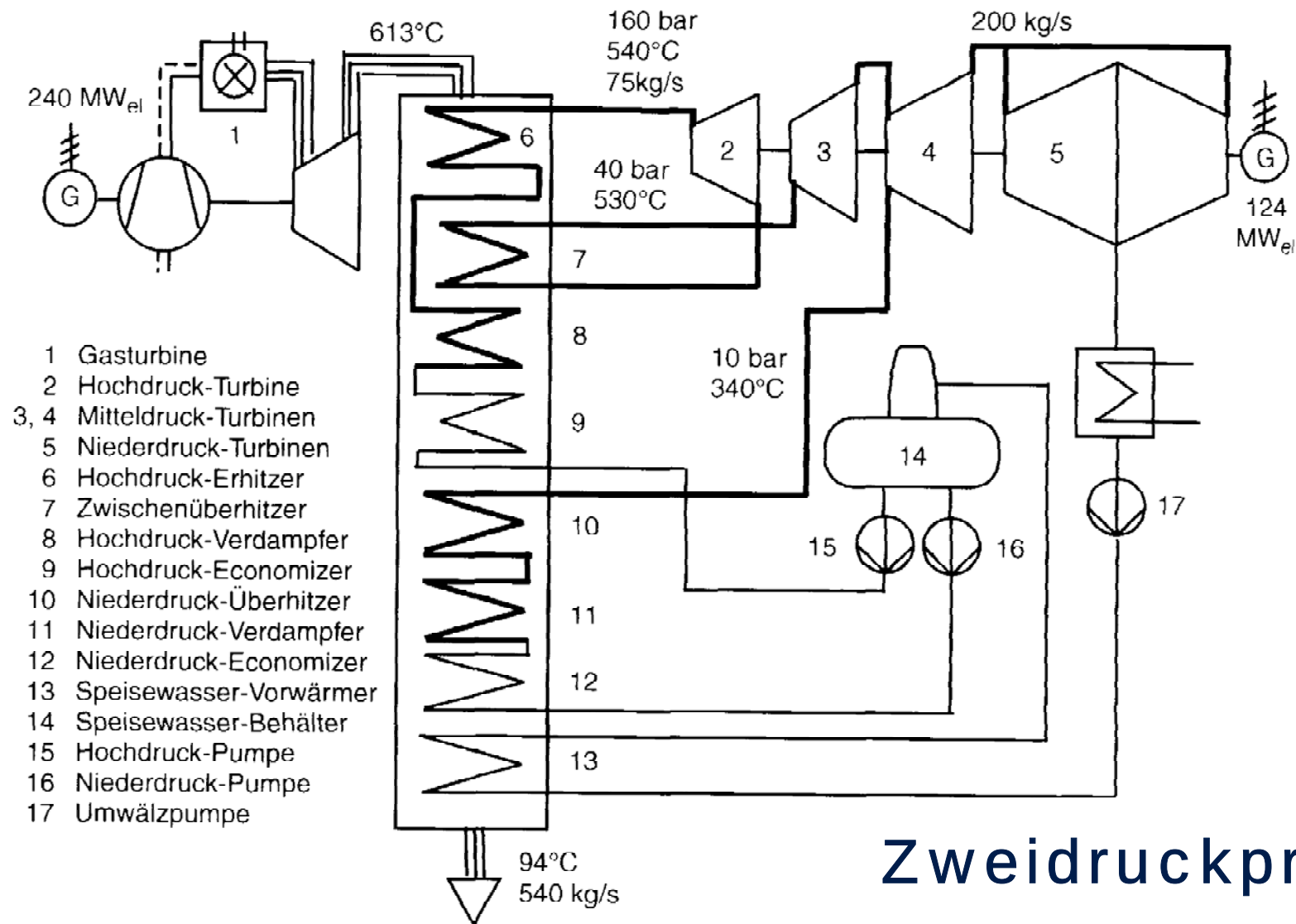
- **geringe Grädigkeit (Temperaturdifferenz zwischen Rauchgas und Wasser/Dampf)**
- **geringer Druckverlust**
- **niedertemperaturkorrosionsfest**
- **beständig gegen hohe Temperaturgradienten**

→ Aufbau aus dünnen Rippenrohren

Eindruckprozess

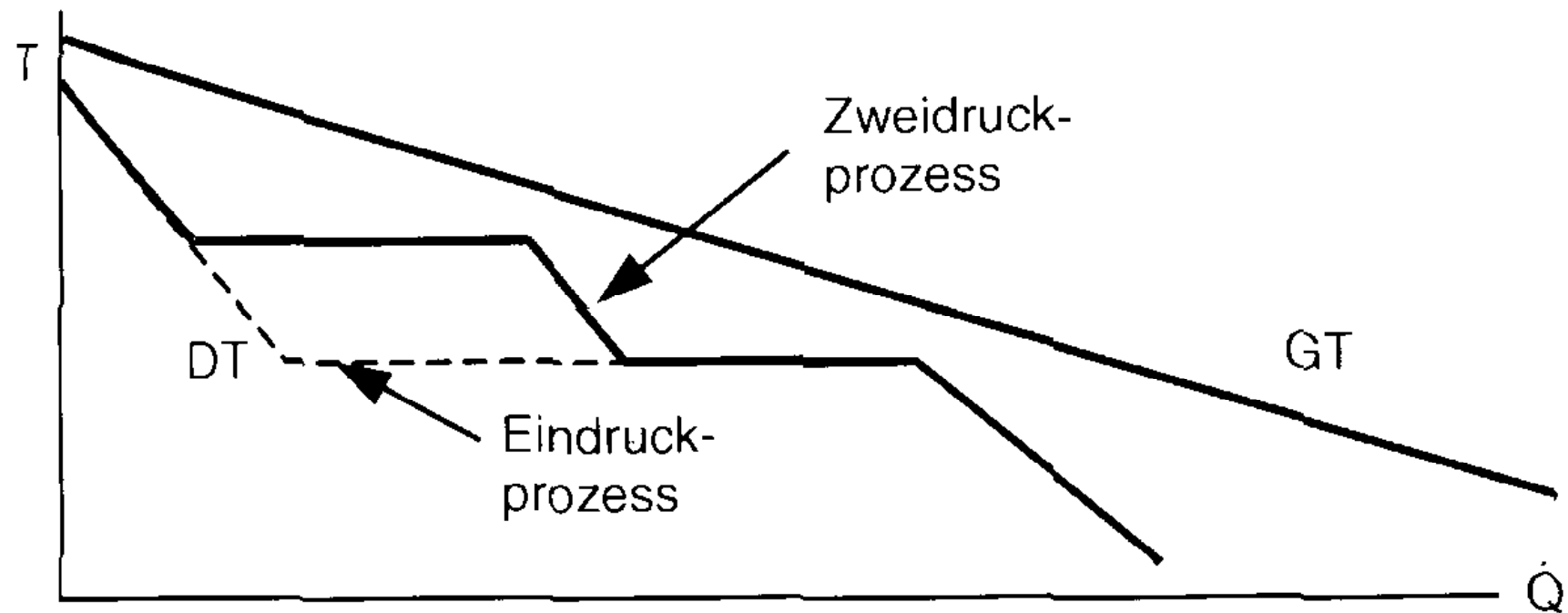


- 1 Verdichter
- 2 Gasturbine
- 3 Bypass Abgaskamin
- 4 Überhitzerstrecke
- 5 Verdampferstrecke
- 6 Vorwärmer
- 7 Trommel
- 8 Dampfturbine
- 9 Kondensator
- 10 Speisewasser-
behälter
- 11 Speisewasser-
pumpe
- 12 Umwälzpumpe

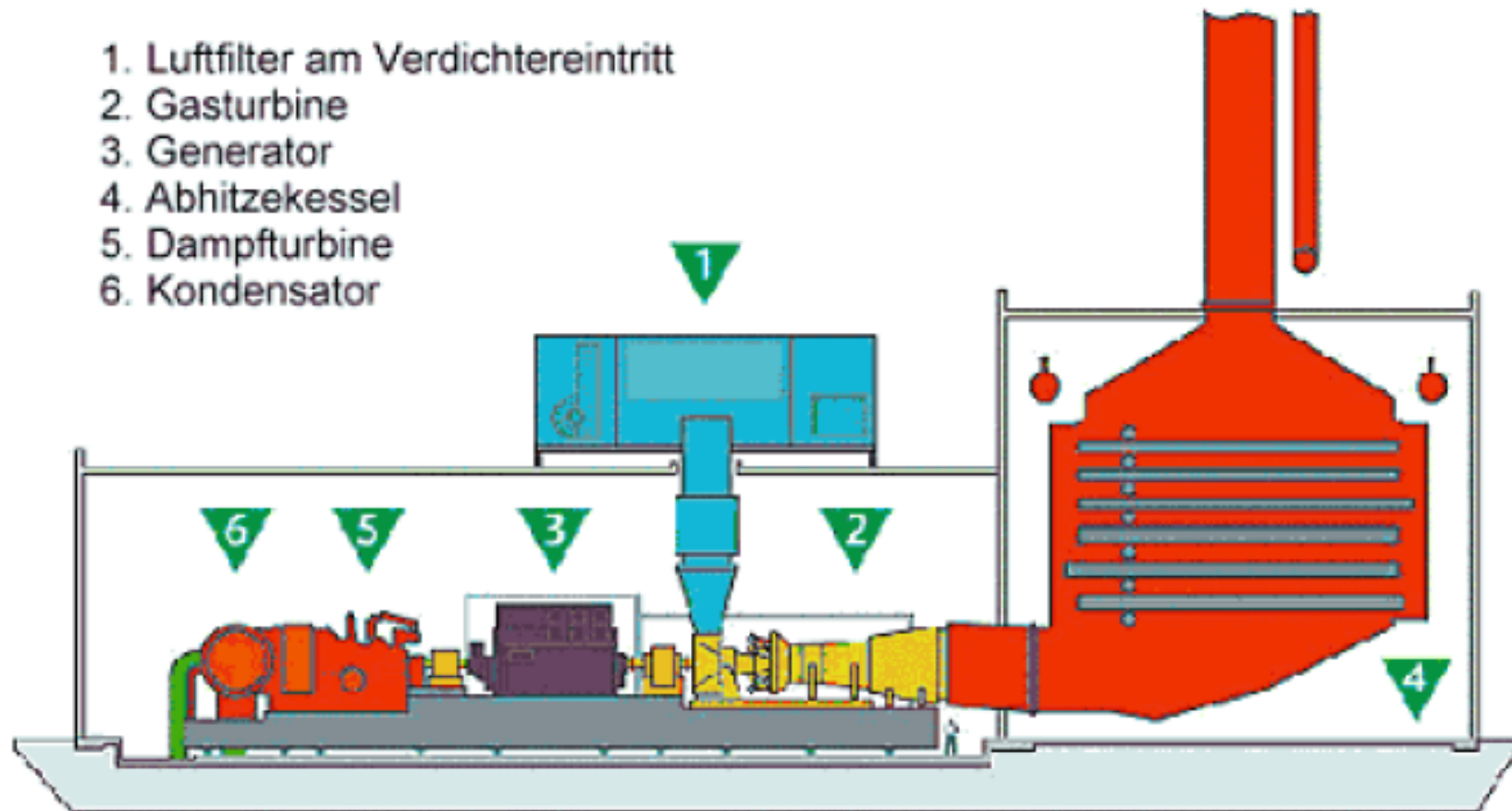


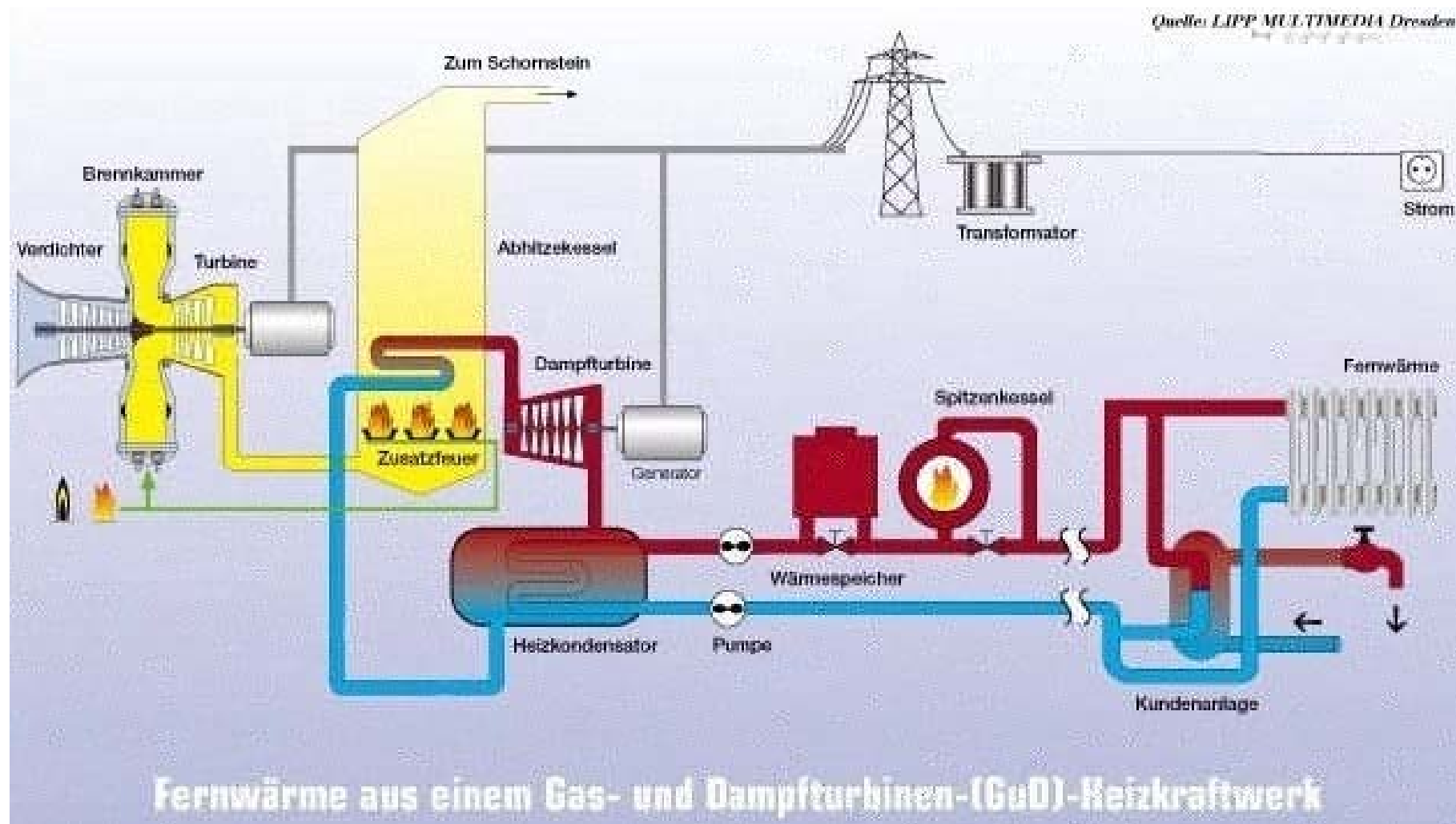
Zweidruckprozess

Wärmeabgabe der GT und Wärmeaufnahme des Abhitzekessels



Schnitt durch eine GuD-Anlage



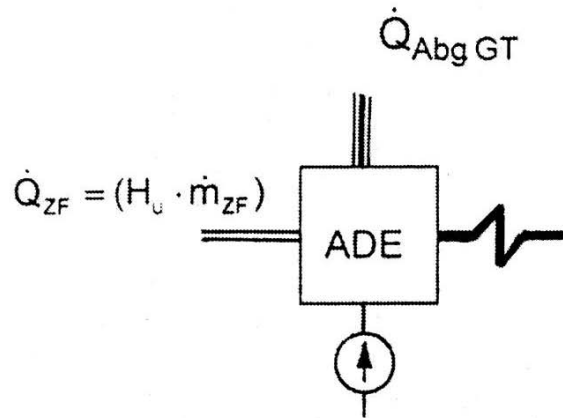


GuD-Kraftwerk mit Zusatzfeuerung

$$\eta_{GT} = \frac{P_{GT}}{\dot{Q}_{GT}}$$

$$\eta_{DT} = \frac{P_{DT}}{\dot{Q}_{Abg.} + \dot{Q}_{ZF}}$$

Der O₂-Gehalt der Abgase aus der GTA ist i.a. über 15 Vol.-%-O₂ und damit ausreichend für die Zusatzverbrennung.



$$\dot{Q}_{Abg.} = \dot{Q}_{GT} \cdot (1 - \eta_{GT})$$

$$\eta_{GuD} = \frac{P_{GT} + P_{DT}}{\dot{Q}_{GT} + \dot{Q}_{ZF}}$$

Zusatzfeuerung

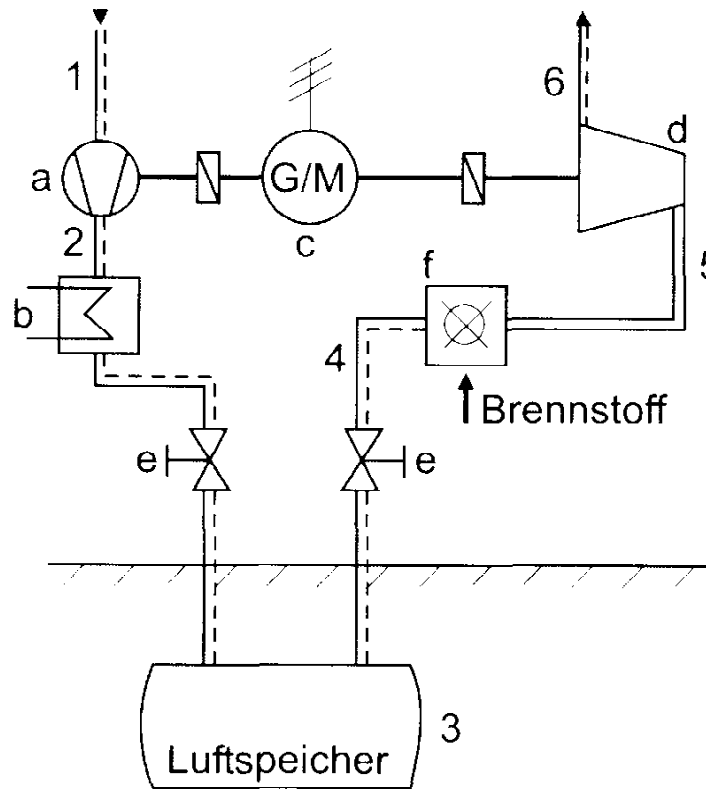
Mit ZF:

$$\eta_{GuD} = \frac{\eta_{GT} \cdot \dot{Q}_{GT} + \eta_{DT} [\dot{Q}_{ZF} + \dot{Q}_{GT}(1 - \eta_{GT})]}{\dot{Q}_{GT} + \dot{Q}_{ZF}}$$

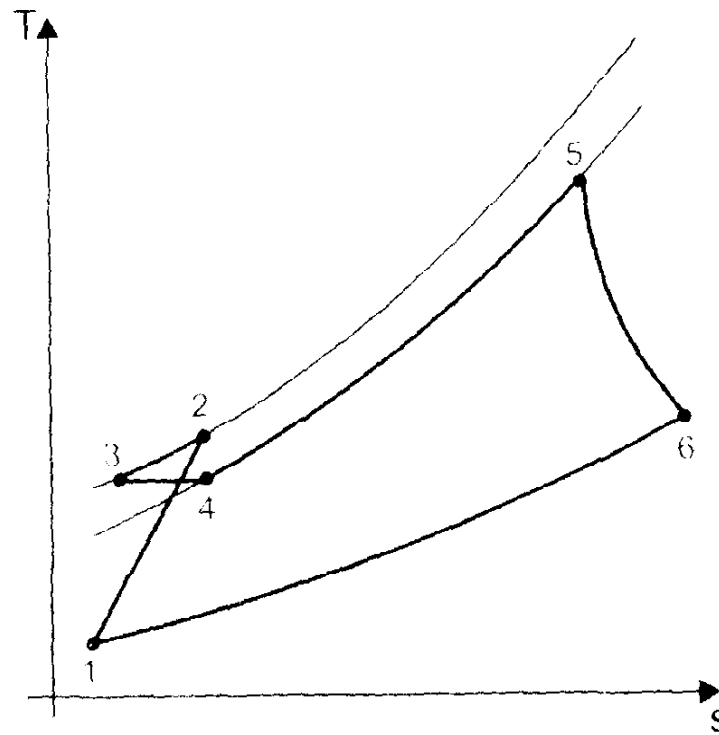
$$\eta_{GuD} = \frac{\eta_{GT} + \eta_{DT} \left[\frac{\dot{Q}_{ZF}}{\dot{Q}_{GT}} + 1(1 - \eta_{GT}) \right]}{1 + \frac{\dot{Q}_{ZF}}{\dot{Q}_{GT}}}$$

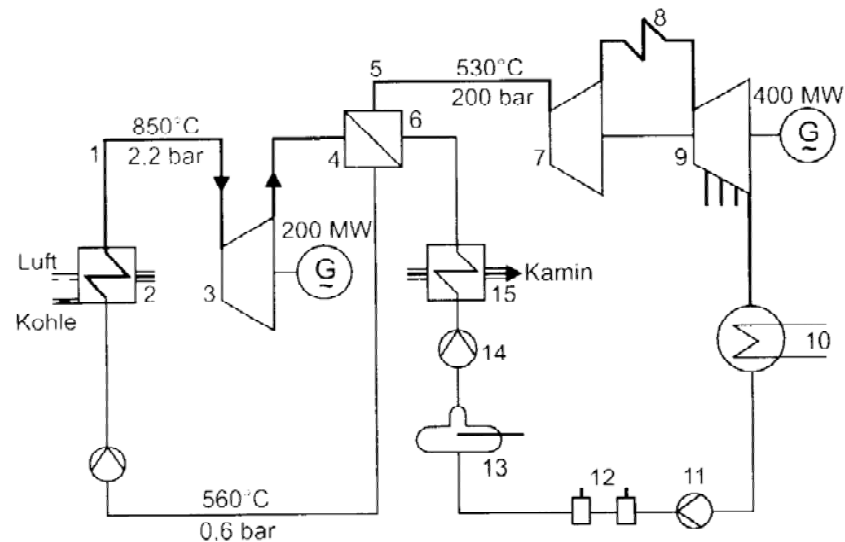
Schnittbild durch das Gas- und Dampf- Heizkraftwerk Berlin-Mitte



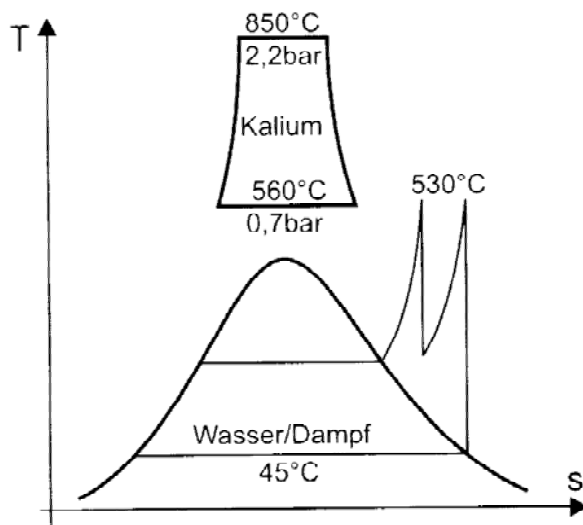


- a Verdichter
- b Luftkühler
- c Motor/Generator
- d Turbine
- e Schieber
- f Brennkammer





- | | | |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 Kaliumkreislauf | 6 Verdampfer/Überhitzer | 11 Kondensatpumpe |
| 2 Kaliumverdampfer | 7 HD-Turbine | 12 Vorwärmer |
| 3 Kaliumturbine | 8 Zwischenüberhitzer | 13 Speisewasserbehälter |
| 4 Kaliumkondensator | 9 ND-Turbine | 14 Speisepumpe |
| 5 Wasserkreislauf | 10 Kondensator | 15 Economizer |



Kalium-Wasser-Dampfkraftprozess