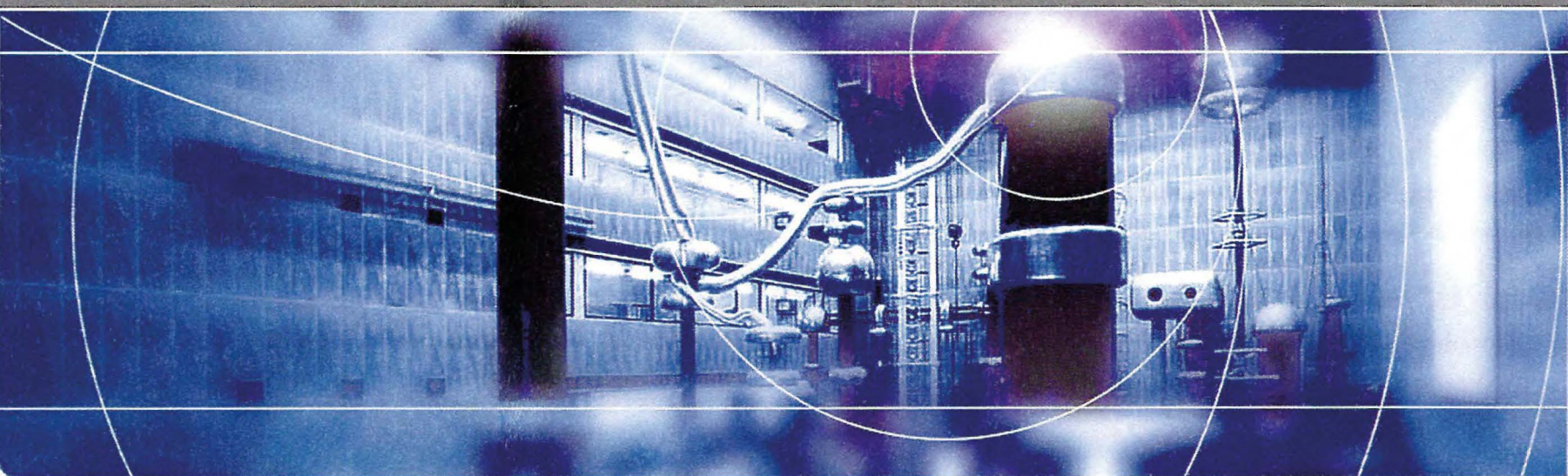


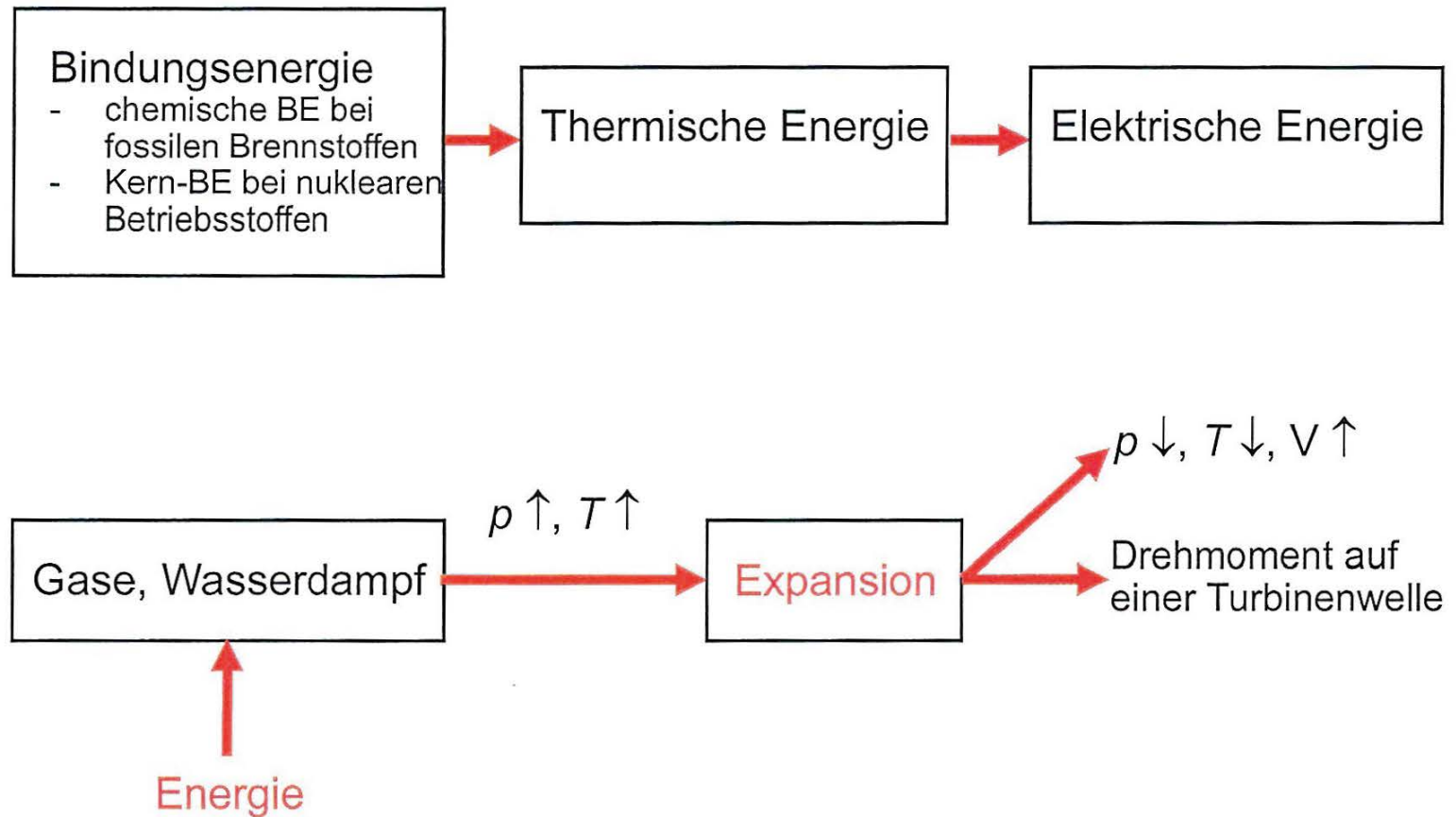
Erzeugung elektrischer Energie

Dr.-Ing. Bernd Hoferer

INSTITUT FÜR ELEKTROENERGIESYSTEME UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK (IEH)



Wärmekraftwerke: Prinzip



Thermodynamische Grundbegriffe: Gasgesetze (I)

Zustandsgrößen von Gasen:

- Druck p
 - Temperatur T
 - Volumen V
 - Entropie S
 - Enthalpie h
 - innere Energie U
- } **direkt meßbar**
- } **abgeleitete Größen**

Gesetz von Boyle und Mariotte für $T = \text{const.}$ gilt: $p \cdot V = \text{const.}$

1. *Gesetz von Gay-Lussac* für $p = \text{const.}$ gilt: $V = V_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0))$

2. *Gesetz von Gay-Lussac* für $V = \text{const.}$ gilt: $p = p_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0))$

Ideale Gase, viele reale Gase: $\alpha = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273,15\text{K}}$

$$\boxed{\frac{p \cdot V}{T} = \text{const} = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0}}$$

Thermodynamische Grundbegriffe: Gasgesetze (II)

Gasgesetze:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const} = \frac{p_0 \cdot V_0}{T_0}$$

$$p \cdot V = \nu \cdot R \cdot T$$

ν : Stoffmenge des Gases

$$R = 8,31451 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

(allgemeine Gaskonstante)

1. Hauptsatz der Thermodynamik:

$$dU = dQ + dW$$

+ : Energie (Arbeit dW , Wärme dQ) wird dem System zugeführt

- : Energie (dW , dQ) wird vom System abgeführt

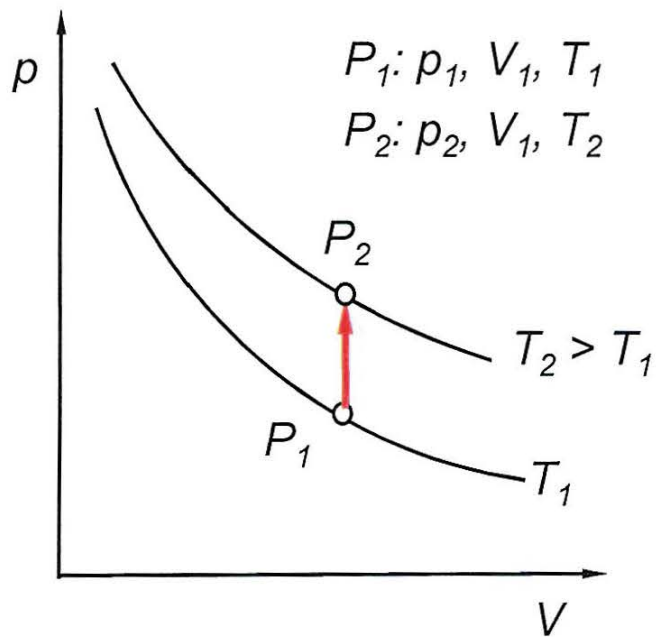
Innere Energie eines Gases:

$$U = \nu \cdot C_{mv} \cdot T$$

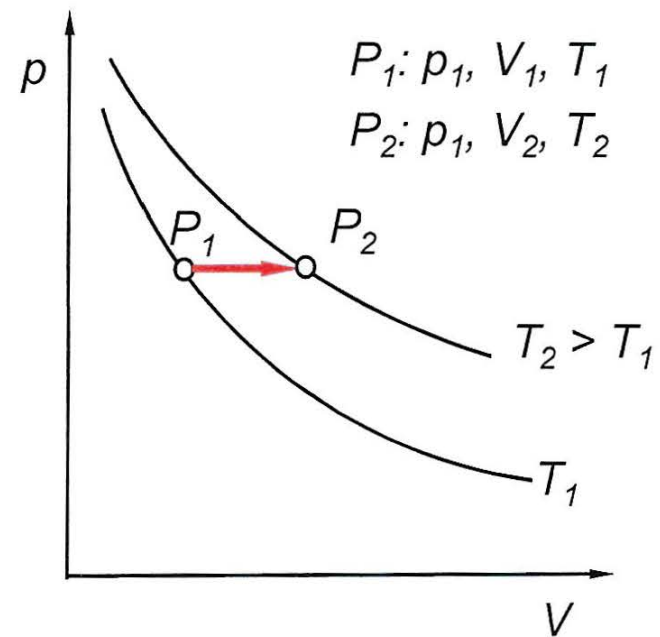
C_{mv} ist die molare Wärmekapazität des Gases bei konstantem Volumen V

Zustandsänderungen (I)

Isochore Zustandsänderung

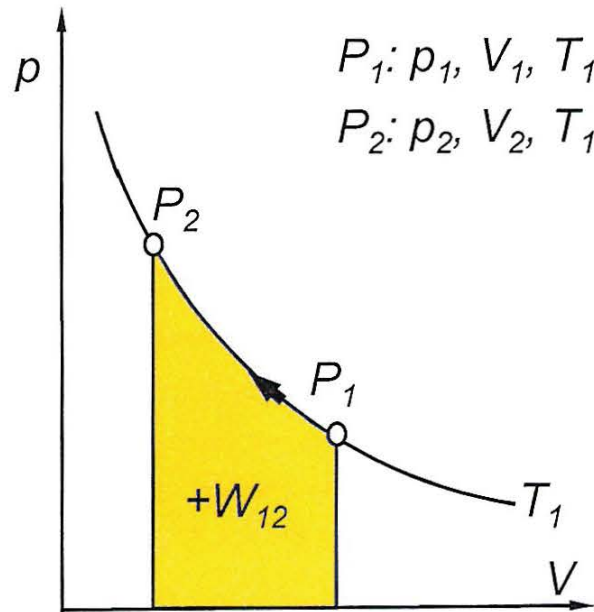


Isobare Zustandsänderung



Zustandsänderungen (II)

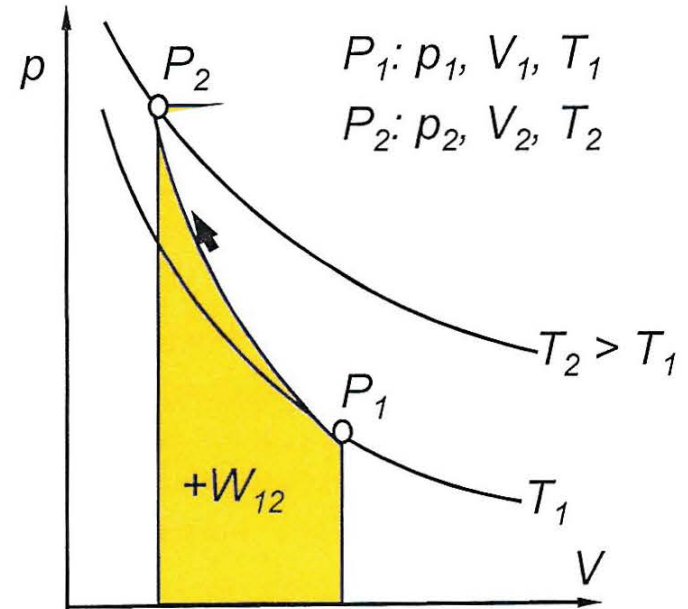
Isotherme Zustandsänderung



$$W_{12} = - \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{v \cdot R \cdot T}{V} \cdot dV = v \cdot R \cdot T \cdot \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$

$$dU = dQ + dW = 0 \quad \text{wegen } U = v \cdot C_{mv} \cdot T \text{ und } T = \text{const.}$$

Adiabatische Zustandsänderung



$$p \cdot V^{\kappa} = \text{const.} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} T_1 \cdot V_1^{\kappa-1} = T_2 \cdot V_2^{\kappa-1}$$

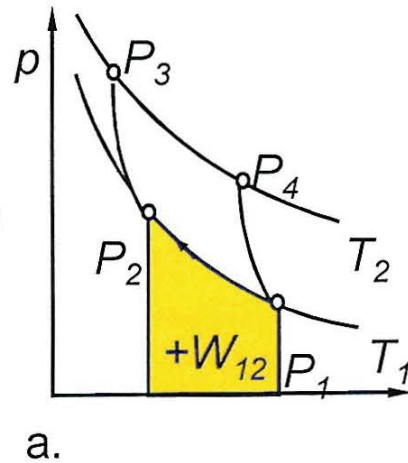
$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const.}$$

$$dQ = 0, \text{ d.h. } dU = dW = v \cdot C_{mv} \cdot dT$$

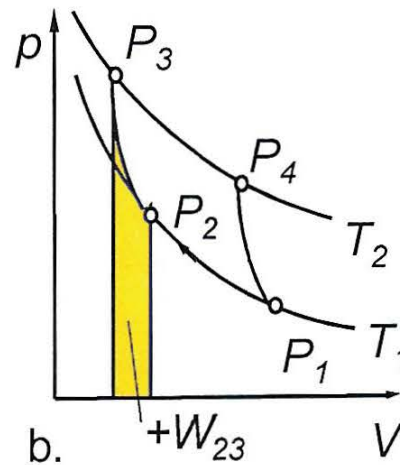
$$W_{12} = v \cdot C_{mv} \cdot (T_2 - T_1) > 0$$

Carnot-Prozeß: idealer Vergleichsprozess

Isotherme
Kompression

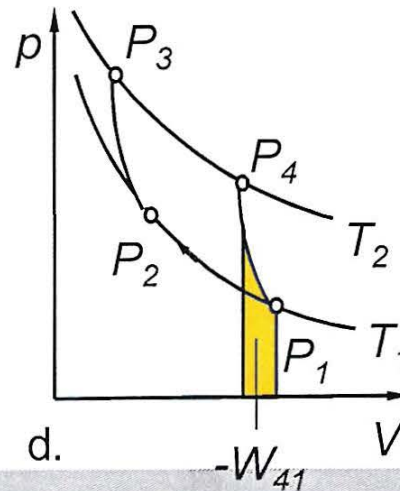
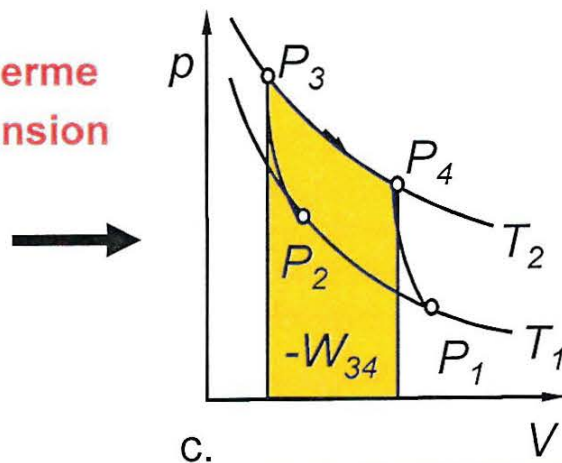


Isentrop = adiabatisch + verlustfrei



Isentrope
Kompression

Isotherme
Expansion



Isentrope
Expansion

Carnot-Prozeß: Prozeßschritte

$$W_{12} = - \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{v \cdot R \cdot T}{V} \cdot dV = v \cdot R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

$$dQ = 0, d.h. \quad dU = dW = v \cdot C_{mv} \cdot dT \quad W_{23} = v \cdot C_{mv} \cdot (T_2 - T_1) > 0$$

① Isotherme Kompression $P_1 \Rightarrow P_2$

zugeführte Arbeit: $W_{12} = vRT_1 \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$

abzuführende Wärme: $Q_{12} = -W_{12} = -vRT_1 \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$

② Isentrope Kompression $P_2 \Rightarrow P_3$

zugeführte Arbeit: $W_{23} = v \cdot C_{mv} \cdot (T_2 - T_1)$

= Erhöhung der inneren Energie wegen $dQ = 0$

③ Isotherme Expansion $P_3 \Rightarrow P_4$

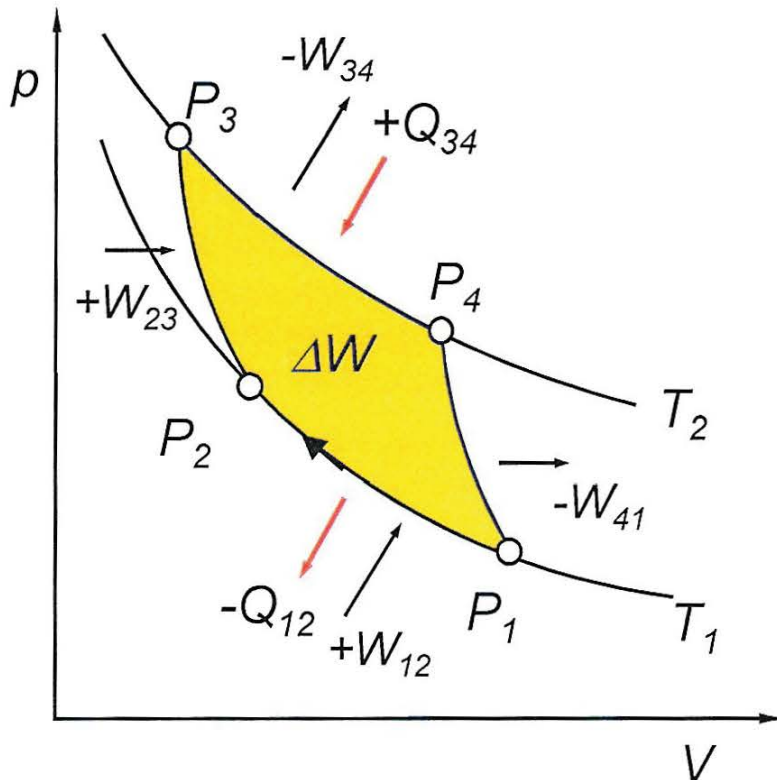
zugeführte Wärme: $Q_{34} = -W_{34} = vRT_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$

System leistet die Arbeit: $W_{34} = -vRT_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$

④ Isentrope Expansion $P_4 \Rightarrow P_1$

System leistet die Arbeit: $W_{41} = v \cdot C_{mv} \cdot (T_1 - T_2)$

= Verringerung der inneren Energie wegen $dQ = 0$



Carnot-Prozeß: Wirkungsgrad

Für die isentropen Zustandsänderungen ($P_2 \rightarrow P_3$ und $P_4 \rightarrow P_1$) gilt:

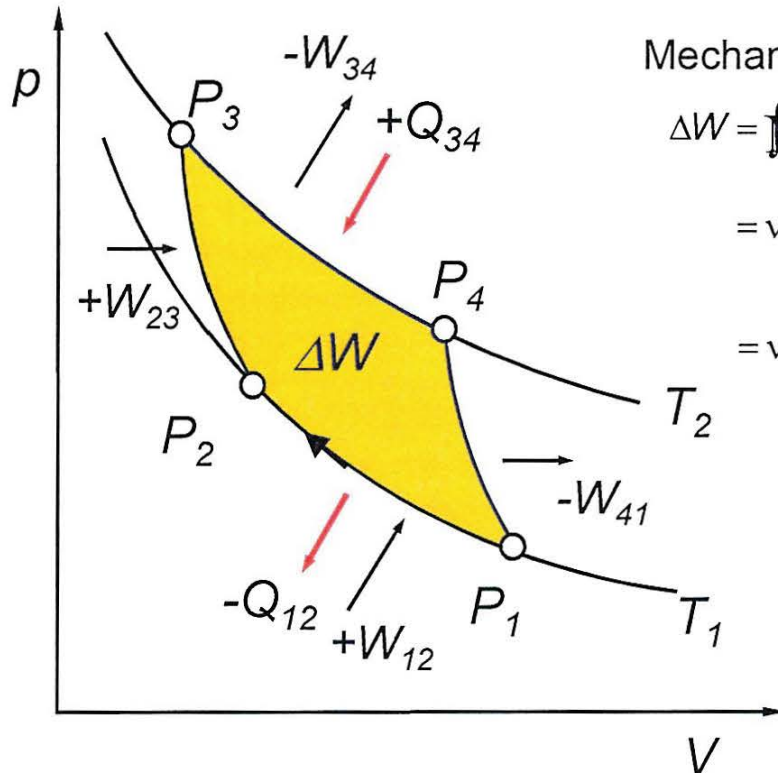
$$T \cdot V^{\kappa-1} = \text{const.}$$

$$T_1 \cdot V_2^{\kappa-1} = T_2 \cdot V_3^{\kappa-1}$$

$$T_2 \cdot V_4^{\kappa-1} = T_1 \cdot V_1^{\kappa-1}$$



$$\frac{T_2 \cdot V_4^{\kappa-1}}{T_1 \cdot V_1^{\kappa-1}} = \frac{T_2 \cdot V_3^{\kappa-1}}{T_1 \cdot V_2^{\kappa-1}} \quad \text{oder} \quad \frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_2}$$



Mechanische Arbeit des Carnot-Prozesses:

$$\Delta W = \oint p dV = W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41}$$

$$= vRT_1 \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) + v \cdot C_{mv}(T_2 - T_1) - vRT_2 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) - v \cdot C_{mv}(T_2 - T_1)$$

$$= v \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) = v \cdot R \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) < 0$$

Zugeführte Wärme: $Q_{34} = vRT_2 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) > 0$

$$\eta_{th} = \frac{|\Delta W|}{Q_{34}} = \frac{v \cdot R \cdot (T_2 - T_1) \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)}{vRT_2 \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} < 1$$

Entropie S

Technische Prozesse laufen nicht verlustfrei ab.

⇒ In der Realität muß mehr als $+Q_{34}$ aufgewendet werden, um wieder nach einem Zyklus den Punkt P_1 zu erreichen

Reversibler Carnot-Prozeß:
$$\frac{Q_{12}}{T_1} + \frac{Q_{34}}{T_2} = -\nu \cdot R \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) + \nu \cdot R \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) = 0$$

Definition: Entropie S

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad \Delta S_i = \frac{\Delta Q_i}{T} \Rightarrow \Delta S = \sum_i \frac{\Delta Q_i}{T}$$

Bei reversiblen Kreisprozessen ist: $\sum \frac{Q}{T} = 0$ oder $\oint \frac{dQ}{T} = 0$

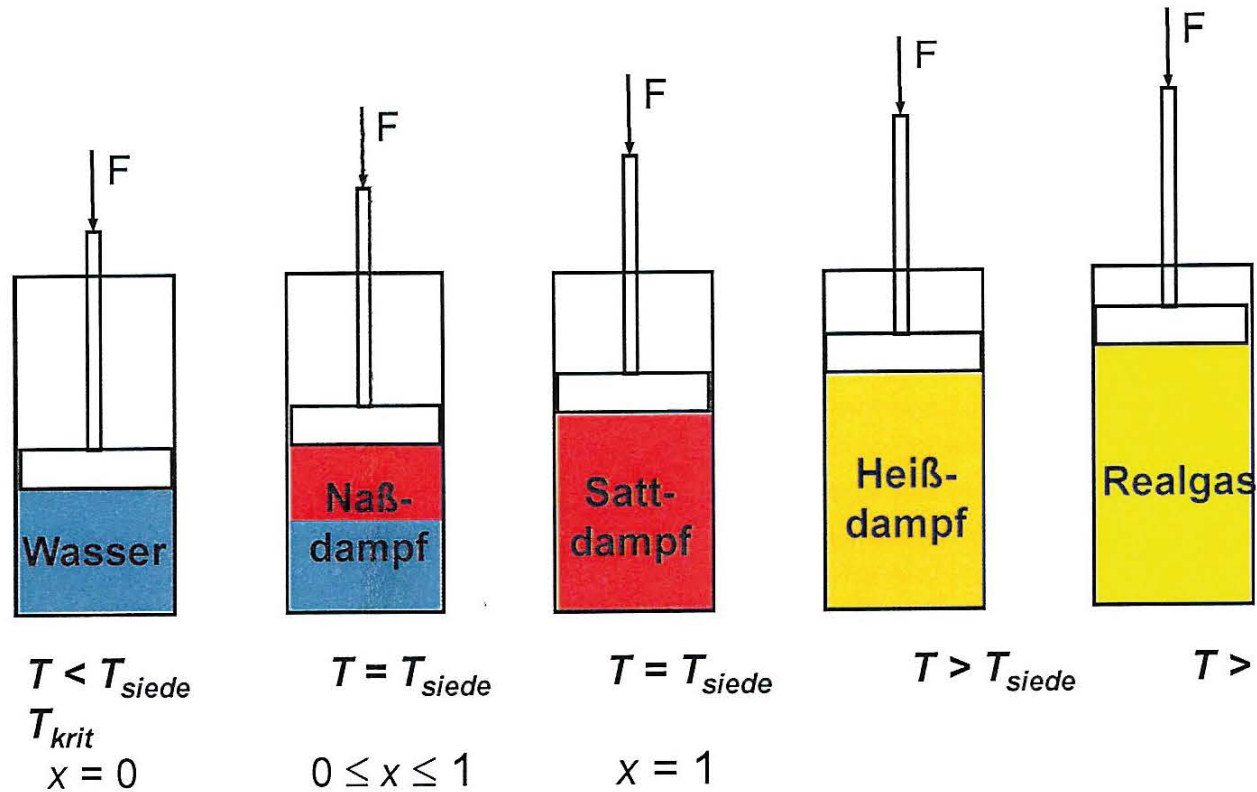
$$dS = \frac{dQ}{T} = \frac{dU - dW}{T} = \frac{dU + p dV}{T} \quad \text{mit } dU = \nu \cdot C_{mv} \cdot dT \quad \text{und} \quad p \cdot V = \nu \cdot R \cdot T$$

$$\text{folgt: } dS = \nu \cdot C_{mv} \cdot \frac{dT}{T} + \nu \cdot R \cdot \frac{dV}{V}$$

Integration liefert:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \nu \cdot C_{mv} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + \nu \cdot R \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Dampfgehalt von Wasserdampf



$$x = \frac{m_{Sattdampf}}{m_{Naßdampf}} = \frac{m_{Sattdampf}}{m_{siedendeFlüssigkeit} + m_{Sattdampf}}$$

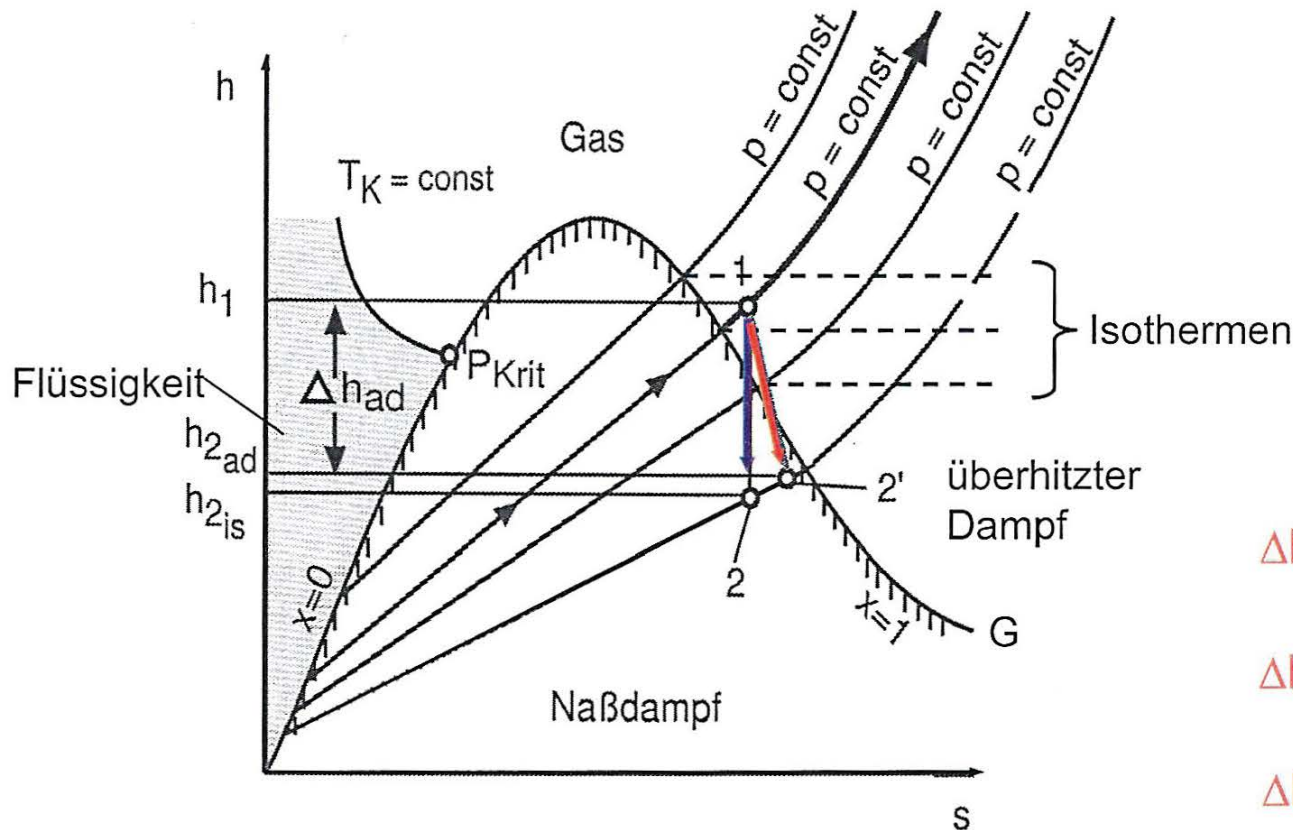
Enthalpie und h(S)-Diagramm

Enthalpie = Summe aus innerer Energie U und Strömungsenergie $p \cdot V$

$$h = U + p \cdot V$$

Frischdampfzustand: $h_1 = U_1 + p_1 \cdot V_1$

Endzustand: $h_2 = U_2 + p_2 \cdot V_2$



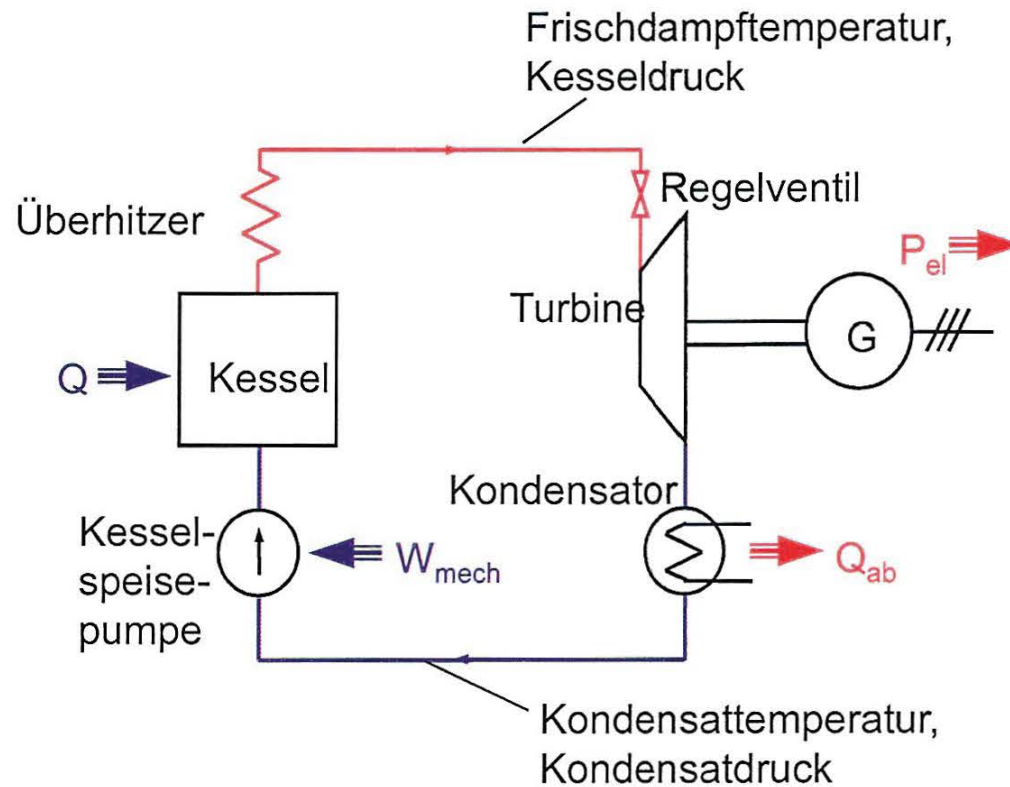
Medium: Wasserdampf

$$\Delta h_{is} = h_1 - h_{2is}$$

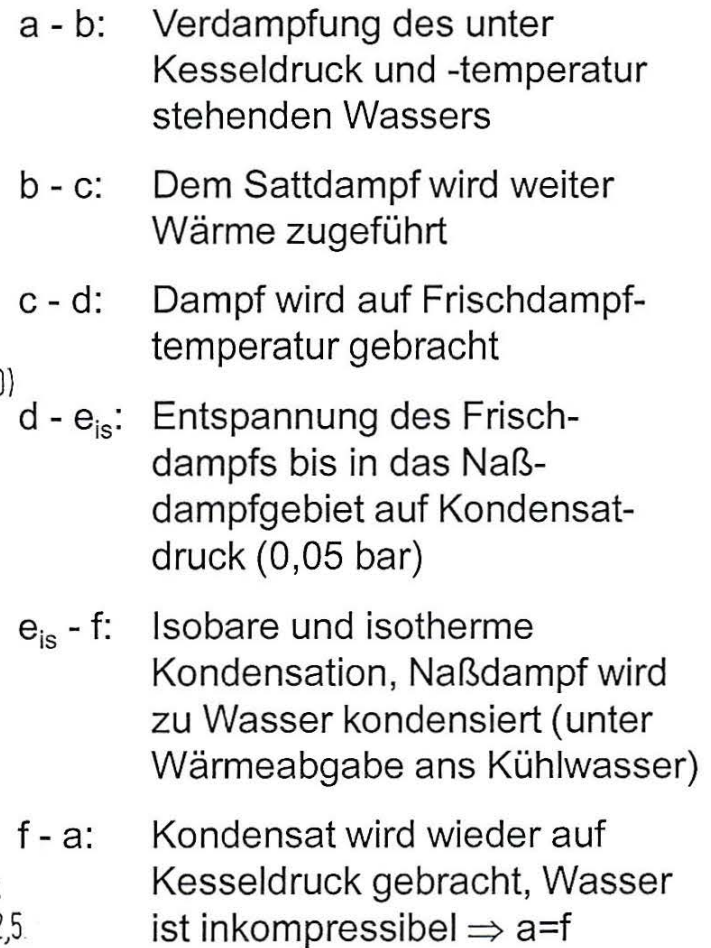
$$\Delta h_{ad} = h_1 - h_{2ad} \quad \Delta S > 0$$

$$\Delta h_{is} > \Delta h_{ad}$$

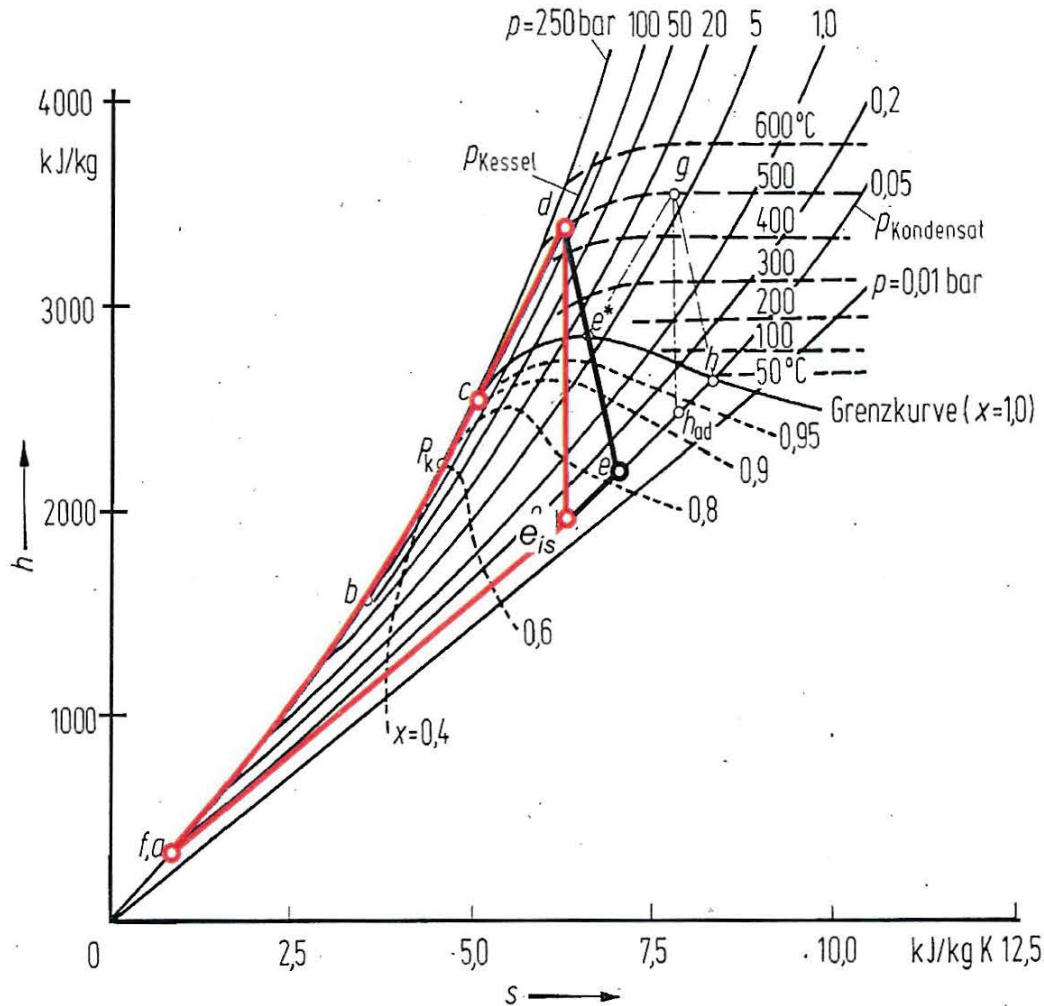
Dampfkraftwerke: Vereinfachter Wasser/Dampf-Kreislauf



KIT
Karlsruhe Institute of Technology



Clausius-Rankine-Kreisprozeß: Wirkungsgrad



Theoretischer thermischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{th,CR} = \frac{h_d - h_{e,is}}{h_d - h_a}$$

Realer Prozeß: $dS > 0$

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \eta_{th,CR} \cdot \eta_i \\ &= \left(\frac{h_d - h_{e,is}}{h_d - h_a} \right) \cdot \left(\frac{h_d - h_e}{h_d - h_{e,is}} \right) \\ &= \frac{h_d - h_e}{h_d - h_a} \end{aligned}$$

η_i thermischer Wirkungsgrad der Turbine

Dampfkraftwerke: Gesamtwirkungsgrad

$$\eta_{ges} = \eta_{th,CR} \cdot \eta_K \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_G \cdot \eta_{EB} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{P_{el}}{\dot{m} \cdot H_u}$$

$\eta_{th,CR} = 0,2 \dots 0,5$ Theoretischer thermischer Wirkungsgrad (Clausius-Rankine-Prozeß)

$\eta_K = 0,7 \dots 0,93$ Kesselwirkungsgrad (Abstrahlung, Rauchgasverluste)

$\eta_i = 0,7 \dots 0,97$ Thermischer Wirkungsgrad der Turbine

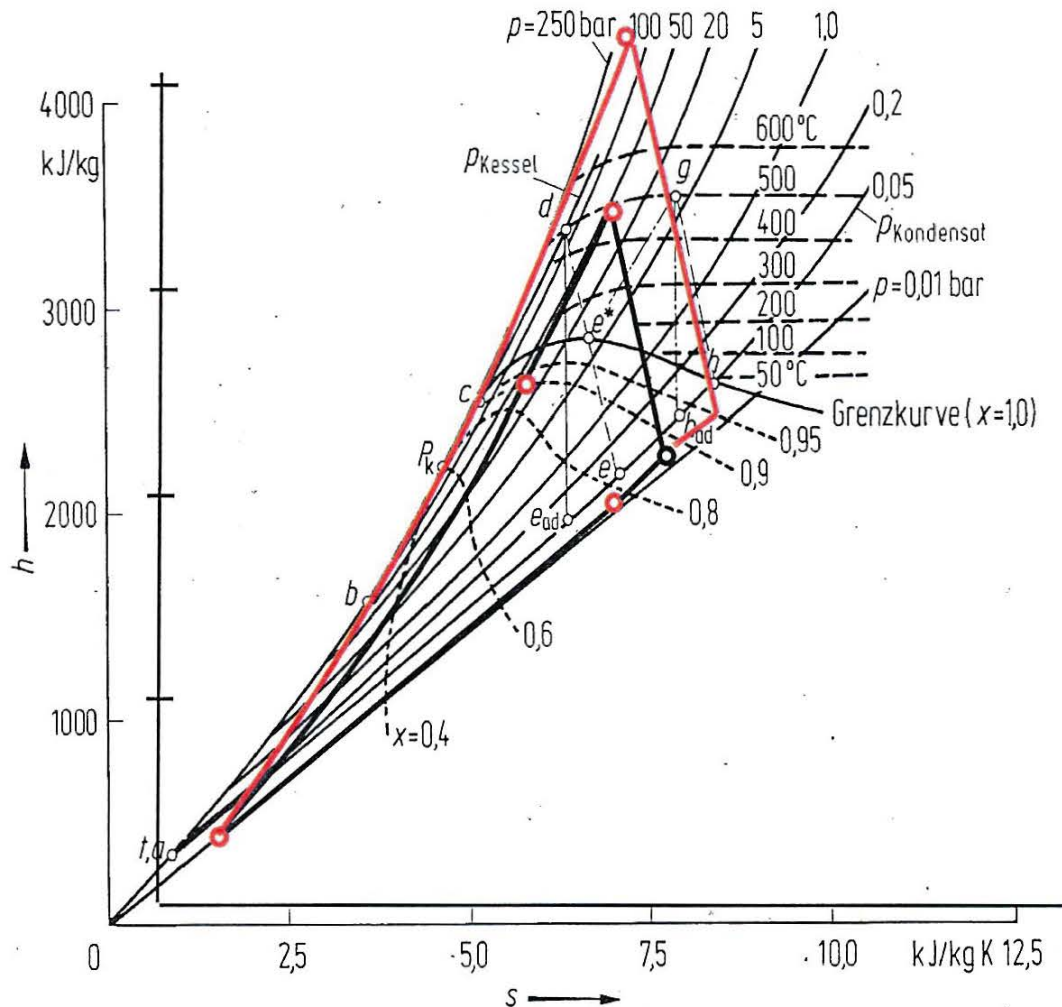
$\eta_m = 0,95 \dots 0,98$ Mechanischer Wirkungsgrad der Turbine (Lagerreibung)

$\eta_G = 0,92 \dots 0,98$ Generatorwirkungsgrad (ohmsche und Wirbelstromverluste)

$\eta_{EB} = 0,9 \dots 0,95$ Eigenbedarfswirkungsgrad (Kesselspeisepumpe, Gebläse, ...)

$$\eta_{ges} = \eta_{th,CR} \cdot \eta_K \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \eta_G \cdot \eta_{EB} = 0,5 \cdot 0,93 \cdot 0,97 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,95 = 0,41..$$

Wirkungsgradsteigerung durch Temperatur- und Druckerhöhung des Frischdampfes



$p \uparrow, T \uparrow$

Problem:
Materialbeanspruchung

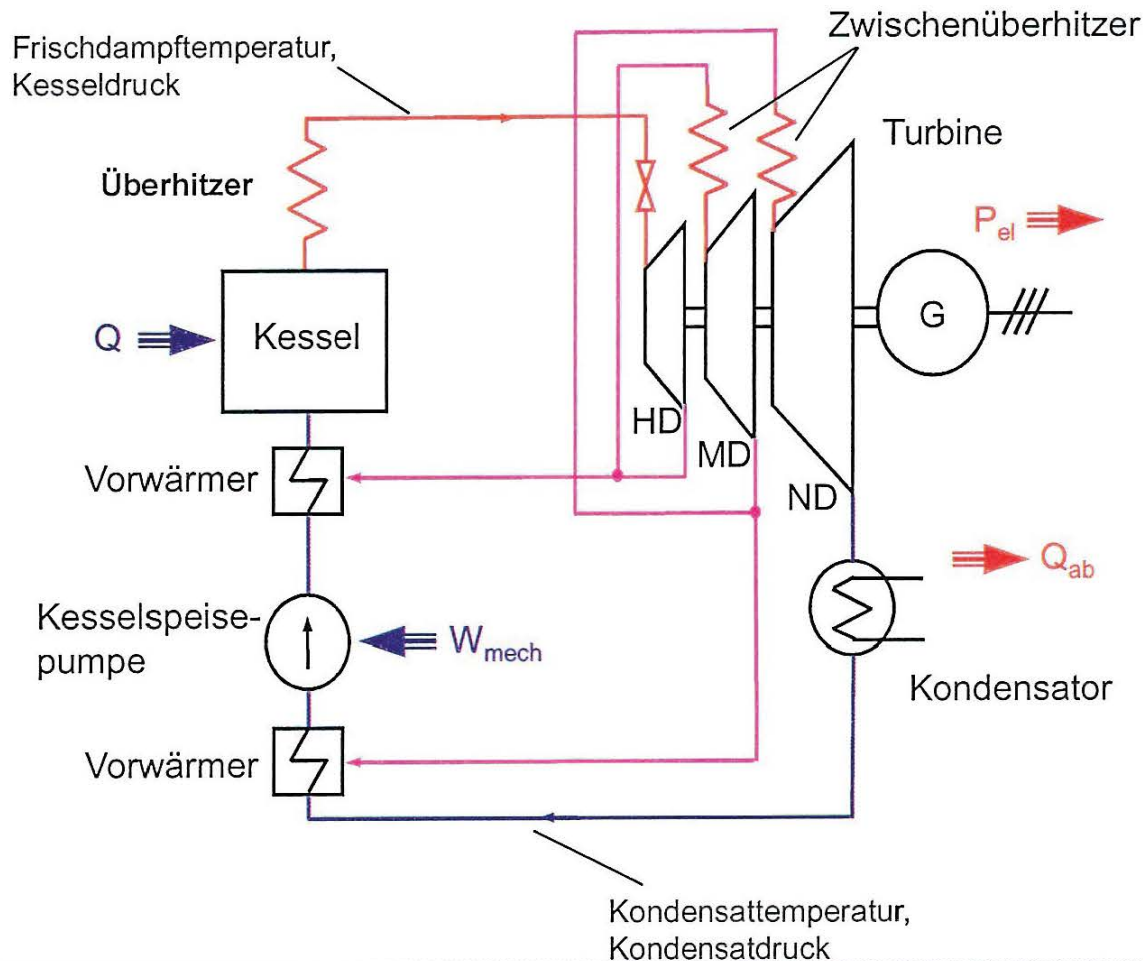
ferritische Werkstoffe
nur bis max. 560 °C,
350 bar.

austenitische Werkstoffe
(hochlegierte Cr, Ni-Stähle)
bis max. 650°C

Geht auf Kosten der
Lebensdauer, Verfügbarkeit
und Zuverlässigkeit
der Anlage

Zukunft: 700°C-Prozeß

Wirkungsgradsteigerung: Zwischenüberhitzung und Speisewasservorwärmung

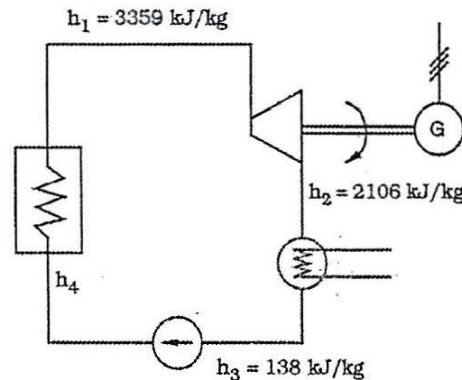


$p \uparrow, T \uparrow$
durch Zwischenüberhitzer

Problem:
Am Ausgang der Turbine kommt der Dampf weit in das Naßdampfgebiet ($x < 1$),
deshalb
Zwischenüberhitzung

Beispiel

In der untenstehenden Abbildung ist das vereinfachte Blockschaftbild eines Dampfkraftwerks (DKW) dargestellt. Der Kessel erzeugt einen Dampfstrom von 20 kg/s mit einer Temperatur von 530°C und einem Druck von 180 bar , entsprechend einem Wärmeinhalt von $h_1 = 3359 \text{ kJ/kg}$. Der Wärmeinhalt des Wassers beim Eintritt in die Kesselspeisepumpe beträgt $h_3 = 138 \text{ kJ/kg}$ bei einer Temperatur von 32°C und einem Druck von $0,05 \text{ bar}$; $h_3 \approx h_4$.



- Welche Leistung gibt die Turbine bei einem mechanischen Wirkungsgrad $\eta_{\text{mech}} = 0,97$ ab?
- Wie groß ist der theoretische thermische Wirkungsgrad η_{th} des DKW, ein Clausius-Rankine-Prozeß vorausgesetzt?
- Wie groß wäre der theoretische thermische Wirkungsgrad eines Carnot-Kreisprozesses bei den vorgegebenen Temperaturen?
- Wie groß ist die Klemmenleistung des Generators, wenn der Generatorwirkungsgrad $\eta_G = 0,95$ beträgt?
- Wie groß ist die Energiezufuhr im Kessel?
(Kesselwirkungsgrad $\eta_K = 0,85$)