

## Formelblatt Konventionelle Energieumwandlung

### Energiewirtschaftliche Begriffe

$$T_m = \frac{W}{P_{max}}$$

$$W = \int_0^T P_{(t)} \cdot dt$$

$T_a$ : 8760 h

$T_m$ : Benutzungsdauer [h/a]

$W$ : Produzierte Energie [kWh]

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

$$\delta = \frac{W_{ab}}{W_{zu}} = \frac{\int_0^T P_{ab} \cdot dt}{\int_0^T P_{zu} \cdot dt}$$

$\eta$ : Wirkungsgrad

$\delta$ : Nutzungsgrad

$W_{ab}$ : Abgenommene Energie [kWh]

$W_{zu}$ : Zuführte Energie [kWh]

### Kosten der Erzeugung elektrischer Energie

$$a_n = \frac{q^n \cdot (q-1)}{q^n - 1}$$

$$q = 1 + \frac{z}{100\%}$$

$$K_{Kap} = A_n = a_n \cdot K_{Invest}$$

$a_n$ : Annuitätsfaktor

$q$ : Zinsfluss

$K_{Kap}$ : Kapitalkosten

$A_n$ : Annuität

$z$ : Zinssatz

$n$ : Jahre

$$k_p = \frac{p \cdot K_{Invest}}{100\% \cdot P_{Max}} = \frac{K_{Fest}}{P_{Max}}$$

$$K_{Fest} = p \cdot K_{Invest}$$

$k_p$ : spez. Festkosten [€/kWh]

$p$ : Festkostensatz [%]

$K_{Fest}$ : Festkosten [€]

$$K_{Fest} = K_{Kap} + K_{Pers} + K_{Steu\&Vers} + K_{Wart\&Inst}$$

$K_{Kap}$ : Kapitalkosten [€]

$K_{Pers}$ : Personalkosten [€]

$K_{Steu\&Vers}$ : Steuer & Versicherung [€]

$K_{Wart\&Inst}$ : Wartung & Instandhaltung [€]

$$k_w = \frac{K_{Bew}}{W}$$

$$K_{Bew} = K_{BS} = k_{BS} \cdot BS$$

$k_w$ : spez. Stromerzeugungskosten [€/kWh]

$W$ : Produzierte Energie [kWh]

$K_{Bew}$ : Bewegliche Kosten [€]

$k_{BS}$ : spez. Brennstoffkosten [€/t]

$BS$ : Brennstoffmenge [t]

$$k = \frac{K_{ges}}{W} = \frac{k_p}{T_m} + k_w$$

$$K_{Ges} = K_{Fest} + K_{Bew}$$

$K_{BS}$ : Brennstoffkosten [€]

$K_{Ges}$ : Gesamtkosten [€]

$k$ : spez. Gesamtkosten [€/kWh]

### Wirkungsgrade Fossile Dampfkraftwerke

$$P_{zu} \rightarrow \boxed{\eta_K} \text{ Kessel}$$

$$P_{Dampf} \rightarrow \boxed{\eta_T} \text{ Turbine}$$

$$P_{Gen.zu} \rightarrow \boxed{\eta_G} \text{ Generator}$$

$$P_{Brutto} \rightarrow P_{Netto}$$

$$\eta_{therm} = \frac{P_{Gen.zu}}{P_{zu}}$$

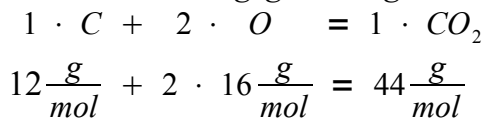
$$\eta_{Brutto} = \frac{P_{Brutto}}{P_{zu}}$$

$$\eta_{Netto} = \frac{P_{Netto}}{P_{zu}}$$

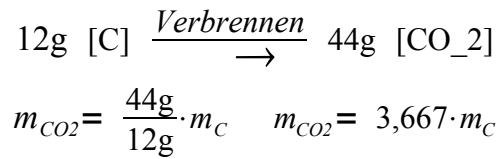
$$P_{Netto} = P_{Brutto} - P_{Eigenbedarf}$$

## Verbrennungsrechnung

Verbrennungsgleichung



Massenverhältniss bei sauberer Verbrennung



$$H_o = H_u + 2500 \frac{kJ}{kg} \cdot (9 \cdot h + w)$$

$H_o$ : Brennwert  
 $H_u$ : Heizwert

$$H_u = 34835 \cdot c + 93870 \cdot h + 10465 \cdot s + 6280 \cdot n - 2440 \cdot w - 10800 \cdot o \quad \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

$$BS = \frac{W_{zu}}{H_u} \quad [kg]$$

$$M_{CO_2} = W_{ab,el} \cdot \text{Tabellenwert} \quad \text{siehe Tabellenwert Seite 39}$$

## Verbrennungsluft und Rauchgasmenge

Theoretischer Luftbedarf ( $\lambda=1$ )

$$\text{Feste Brennstoffe} : VL_{MIN} = \frac{0,241 \cdot Hu}{1000} + 0,5 \quad \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

$$\text{Öle} : VL_{MIN} = \frac{0,203 \cdot Hu}{1000} + 2,0 \quad \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Effektiver Luftbedarf

$$VL = \lambda \cdot VL_{MIN} \quad \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Luftüberschuss

$$VL_{UE} = VL - VL_{MIN} \quad \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Theoretisches Rauchgas-Volumen ( $\lambda=1$ )

$$\text{Feste Brennstoffe} : VFR_{MIN} = \frac{0,212 \cdot Hu}{1000} + 1,65 \quad \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

$$\text{Öle} : VFR_{MIN} = \frac{0,265 \cdot Hu}{1000} \quad \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Effektives feuchtes Rauchgas-Volumen

$$VFR = VFR_{MIN} + VL_{UE} \quad \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

## Korrektur Bezugssauerstoffgehalt

$$EB = \frac{EM \cdot 21 - O_2 B}{21 - O_2 B} \left[ \frac{mg}{m^3} \right]$$

$EM$  : Messwert bei Messbedingung  $O_2 M$  in  $mg/m^3$   
 $O_2 B$  : Sauerstoff im Abgas bei Bezugsbedingung in Vol. %  
 $O_2 M$  : Sauerstoff im Abgas bei Messbedingungen in Vol. %

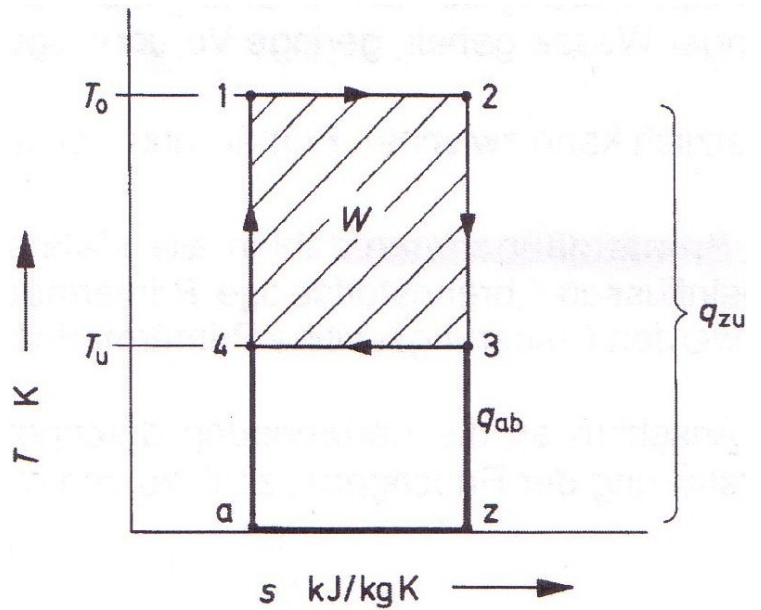
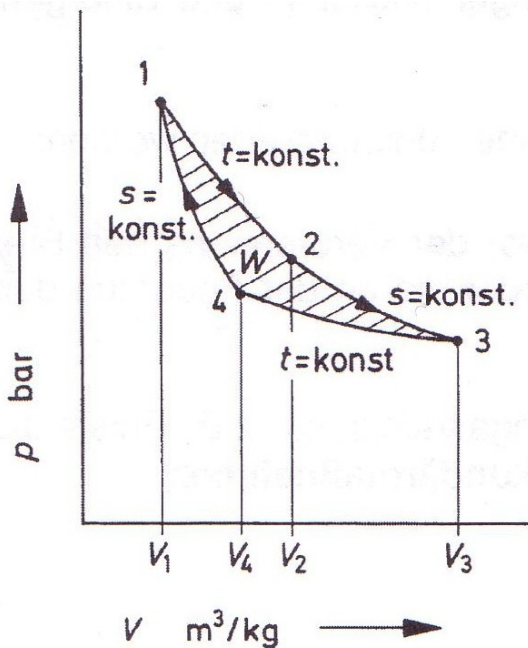
## Thermodynamische Wirkungsgrade

### Thermodynamischer Carnot-Prozess

$$\eta_{th} = \frac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} = \frac{T_o - T_u}{T_o}$$

Der Kreisprozess läuft im Uhrzeigersinn um:

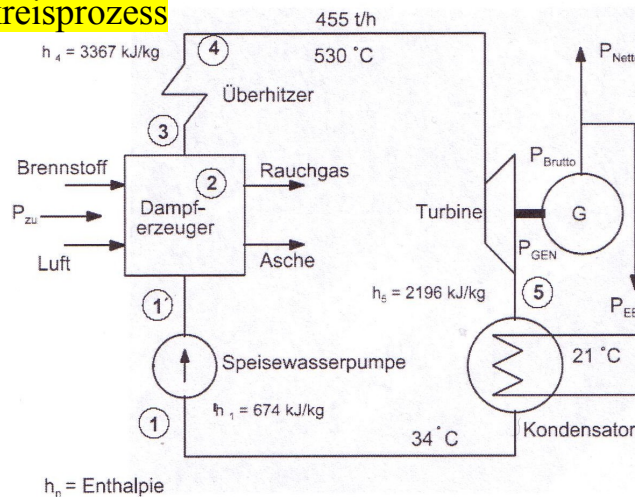
- 1-2: isotherme Expansion unter Wärmezufuhr  $q_{zu}$
- 2-3: isentrope Expansion unter Arbeitsabgabe  $w_{ab}$
- 3-4: isotherme Kompression unter Wärmeabfuhr  $q_{ab}$
- 4-1: isentrope Kompression unter Arbeitszufuhr  $w_{zu}$



### Clausius-Rankine-Dampfkreisprozess

$$\eta_{th} = \frac{h_4 - h_5}{h_5 - h_1}$$

$$P_{mech} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_5)$$



- 1-1' : Kompression auf Kesseldruck
- 1'-2 : Sieden
- 2-3 : Verdampfung
- 3-4 : Überhitzung
- 4-5 : Adiabate Entspannung
- 5-1 : Kühlung

### Joule Prozess (Gasturbine)

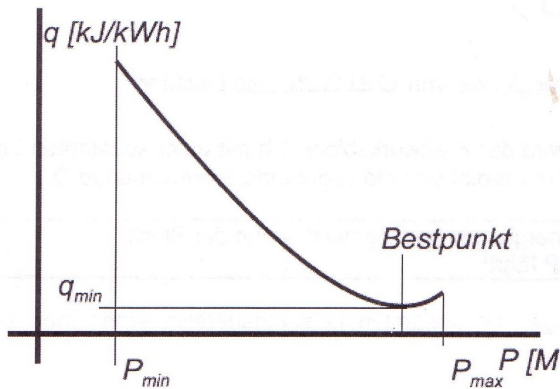
$$\eta_{th} = 1 - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3}$$

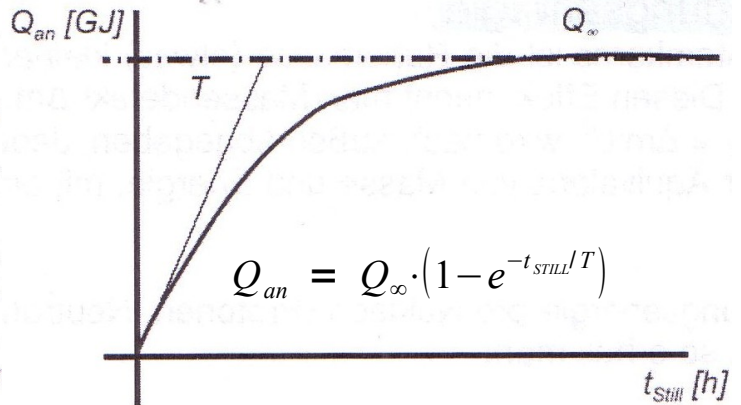
$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

## Energieverbrauch fossiler Kraftwerke

- Spezifischer Brennstoffenergieverbrauch  $q = \dot{Q}/P = f(P)$



- Anfahrenergieverbrauch  $Q_{an} = f(\text{Stillstandszeit } t_{still})$ :

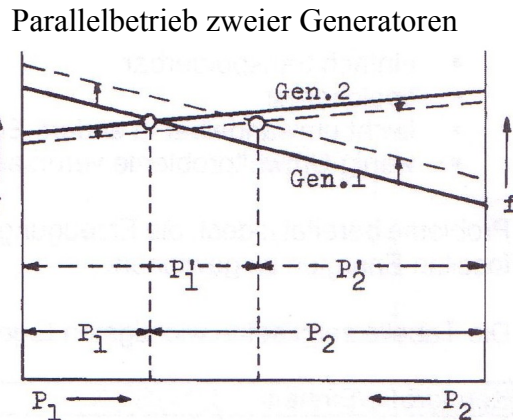
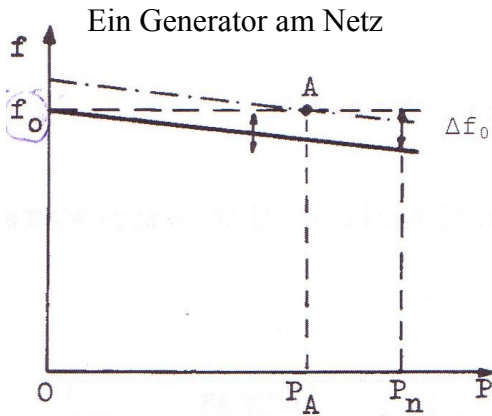


### Zuwachsenergieverbrauch:

$$\Delta \dot{Q} = \frac{\delta \dot{Q}}{\delta P} \cdot \Delta P \quad \text{um den Arbeitspunkt } P_0$$

## Frequenz-Leistungsregelung

### Frequenz-Leistungs-Kennlinien:



$$f = f_0 \cdot \left( 1 - \frac{p}{100\%} \cdot \frac{P}{P_n} \right)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta f} = \frac{P_n}{\Delta f_0}$$

$\Delta P$ : Ausfalleistung  
 $P_n$ : Gesamtleistung  
 $p$ : Statik / P-Grad [%]  
 $f_0$ : Netzfrequenz

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{P_n} \cdot f_0 \cdot \frac{p}{100\%}$$

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{K} \quad \text{mit}$$

$$K = -200000 \frac{MW}{Hz}$$