

**Grundlagen:**

Flüssigkeitskühlung:

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$\dot{Q}$  : Wärmestrom

A : Fläche

$\alpha$  : Wärmedehnzahl

$\Delta T$  : Temperaturdifferenz

Thermische Zustandsgleichung:

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

$$p \cdot v = R \cdot T$$

p: Druck in Pa; 1 bar = 10<sup>5</sup> Pa = 100000 N/ m<sup>2</sup>  
 V: Volumen in m<sup>3</sup>; v: spez. Volumen in m<sup>3</sup>/ kg  
 m: Masse in Kg

R: spezielle Gaskonstante (Luft:  $R = 287 \frac{J}{kg \cdot K}$ )

T: Temperatur in Kelvin; x °C = 273 K + x K

1. Hauptsatz der Thermodynamik:

$$Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1$$

mit:

$$W_{t12} = - \int_1^2 p \cdot dV \quad W = F \cdot s = p \cdot A \cdot s$$

Q: Wärme in J  
 W: Arbeit in J

zugeführte Wärme oder Arbeit: +  
 abgeführte Wärme oder Arbeit: -

Innere Energie:

$$U_2 - U_1 = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

c<sub>v</sub>: spez. Wärme bei konstantem Volumen  
 U: Innere Energie in J

Enthalpie:

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

$$H_2 - H_1 = m \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

$$h_2 - h_1 = c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

c<sub>p</sub>: spez. Wärme bei konstantem Druck  
 H: Enthalpie in J

Spezifische Wärmekapazitäten:

$$c_p > c_v$$

$$R = c_p - c_v$$

$$\chi = \frac{c_p}{c_v} > 1$$

$\chi$  : Isentropenexponent

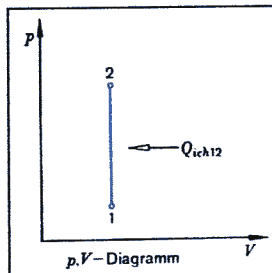
c: spezifische Wärmekapazität in  $\frac{J}{kg \cdot K}$

Gase	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Luft	CO	CO <sub>2</sub>
R [J / (kg*K)]	260	297	287	297	189
c <sub>p</sub> [J / (kg*K)]	908	1.039	1.004	1.039	821
c <sub>v</sub> [J / (kg*K)]	649	743	716	743	632
$\chi$	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3

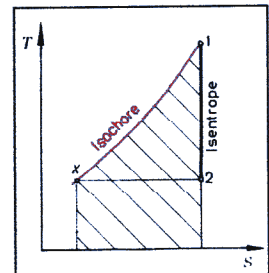
**Zustandsänderungen:**

**Isochore: v = const.**

P-V-Diagramm



T-S-Diagramm



Grundgleichungen:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$v_1 = v_2$$

Wärme:

$$q_{12} = u_2 - u_1 = c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

Volumenänderungsarbeit:

$$w_e = 0$$

Technische Arbeit:

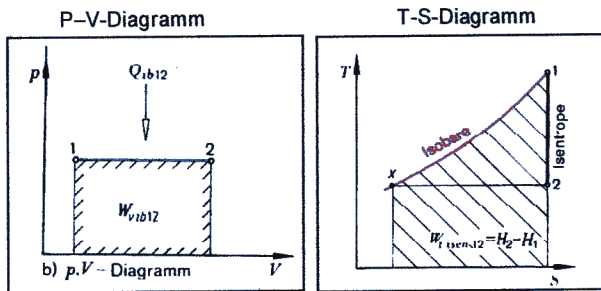
$$w_{t12} = v \cdot (p_2 - p_1)$$

Entropie:

$$s_{12} = c_v \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$s_{12} = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$$

**Isobare:  $p = \text{const.}$**



**Grundgleichungen:**

$$\frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \quad p_1 = p_2$$

**Wärme:**

$$q_{12} = c_p \cdot (T_2 - T_1)$$

$$Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1$$

$$Q_{12} = \underbrace{U_2 + p \cdot V_2}_{H_2} - \underbrace{(U_1 + p \cdot V_1)}_{H_1}$$

**Volumenänderungsarbeit:**

$$w_e = R_i \cdot (T_2 - T_1)$$

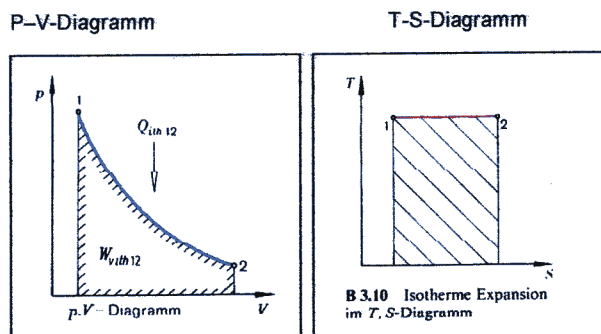
**Technische Arbeit:**

$$w_{t12} = 0$$

**Entropie:**

$$s_{12} = c_p \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} \quad s_{12} = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$$

**Isotherme:  $t = \text{const.}$**



**Grundgleichungen:**

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{p_2}{p_1} \quad T_1 = T_2$$

**Wärme:**

$$q_{12} = w_{12}$$

**Volumenänderungsarbeit:**

$$w_{e12} = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$w_{e12} = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln \frac{v_1}{v_2}$$

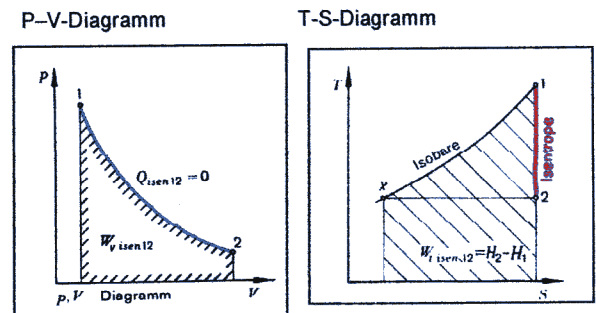
**Technische Arbeit:**

$$w_{t12} = w_{e12}$$

**Entropie:**

$$s_{12} = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} \quad s_{12} = R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$$

**Isentrope:  $q = \text{const. (adiabat)}$**



**Grundgleichungen:**

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$p \cdot V^\gamma = \text{const.}$$

$$Q_{12} + W_{12} = U_2 - U_1$$

$$Q_{12} = 0$$

$$W_{12} = U_2 - U_1 = m \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1)$$

**Wärme:**

$$q_{12} = 0$$

**Volumenänderungsarbeit:**

$$w_{el2} = \frac{p_1 \cdot v_1}{\chi - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\chi - 1}{\chi}} \right] \quad w_{el2} = \frac{p_1 \cdot v_1}{\chi - 1} \left[ 1 - \frac{T_2}{T_1} \right]$$

$$w_{el2} = \frac{p_1 \cdot v_1}{\chi - 1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\chi - 1} \right]$$

**Technische Arbeit:**

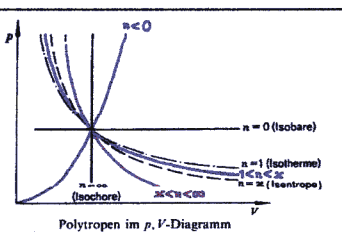
$$w_{tl2} = \chi \cdot w_{el2}$$

**Entropie:**

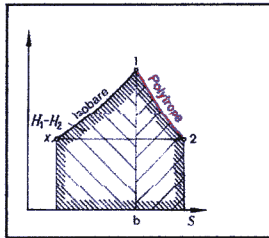
$$s_{12} = 0$$

**Polytrope:**

**P-V-Diagramm**



**T-S-Diagramm**



**Grundgleichungen:**

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$n = \frac{\ln(p_1/p_2)}{\ln(V_2/V_1)} \quad n = 1 + \frac{\ln(T_1/T_2)}{\ln(V_2/V_1)}$$

$$n = \frac{1}{1 - \frac{\ln(T_1/T_2)}{\ln(p_1/p_2)}}$$

**Wärme:**

$$q_{12} = c_v \cdot \frac{n - \chi}{n - 1} \cdot (T_2 - T_1)$$

**Volumenänderungsarbeit:**

$$w_{el2} = \frac{p_1 \cdot v_1}{n - 1} \left[ 1 - \frac{T_2}{T_1} \right] \quad w_{el2} = \frac{p_1 \cdot v_1}{n - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$w_{el2} = \frac{p_1 \cdot v_1}{n - 1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right]$$

**Technische Arbeit:**

$$w_{tl2} = n \cdot w_{el2}$$

**Entropie:**

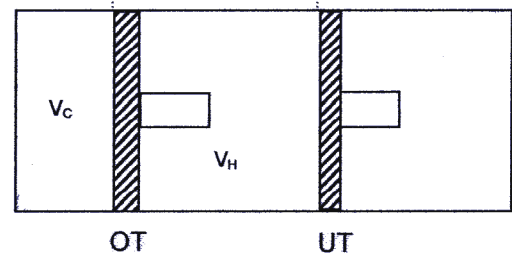
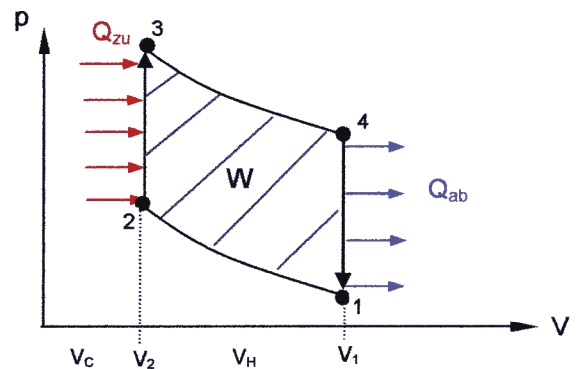
$$s_{12} = c_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$s_{12} = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$s_{12} = c_v \cdot \frac{n - \chi}{n - 1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$$

**Kreisprozesse in Verbrennungsmotoren:**

**Gleichraumprozess (idealer Ottomotor):**



$V_c$  = Kompressionsvolumen

$V_H$  = Hubvolumen  $V_H = V_1 - V_2$

$\epsilon$  = Verdichtungsverhältnis  $\epsilon = \frac{V_1}{V_2}$

**Zustandsänderungen:**

- 1 → 2: adiabate Kompression
- 2 → 3: isochore Wärmezufuhr
- 3 → 4: adiabate Expansion
- 4 → 1: isochore Wärmeabfuhr

**Gesamtarbeit:**

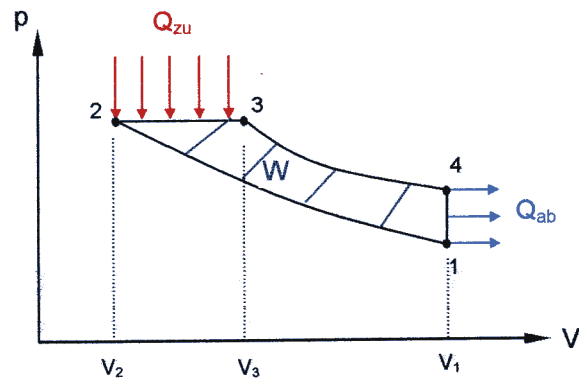
$$|W| = |Q_{zu}| - |Q_{ab}|$$

Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{IWI}{IQ_{zu}I} = \frac{IQ_{zu}I - IQ_{ab}I}{IQ_{zu}I}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\chi-1}}$$

Gleichdruckprozess (idealer Dieselmotor):



Zustandsänderungen:

- 1 → 2: adiabate Kompression
- 2 → 3: isobare Wärmezufuhr
- 3 → 4: adiabate Expansion
- 4 → 1: isochore Wärmeabfuhr

Einspritzverhalten:

$$\varphi = \frac{V_3}{V_2}$$

Gesamtarbeit:

$$IWI = IQ_{zu}I - IQ_{ab}I$$

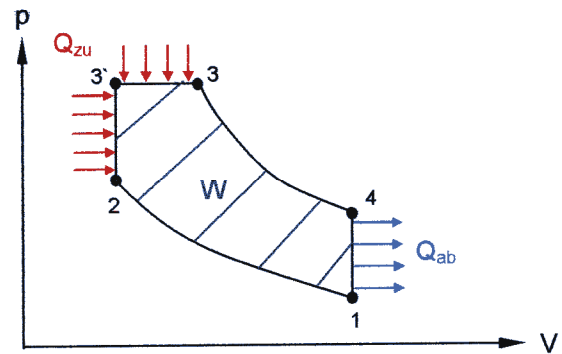
Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{IWI}{IQ_{zu}I} = \frac{IQ_{zu}I - IQ_{ab}I}{IQ_{zu}I}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\chi \cdot \varepsilon^{\chi-1}} \cdot \frac{\varphi^{\chi} - 1}{\varphi - 1}$$

mit:  $\varepsilon = \text{Verdichtungsverhältnis}$   $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$

Seilinger-Prozess:



Zustandsänderungen:

- 1 → 2: adiabate Kompression
- 2 → 3: isochore Wärmezufuhr
- 3 → 4: isobare Wärmezufuhr
- 3 → 4: adiabate Expansion
- 4 → 1: isochore Wärmeabfuhr

Gesamtarbeit:

$$IWI = IQ_{zu}I - IQ_{ab}I$$

Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{IWI}{IQ_{zu}I} = \frac{IQ_{zu}I - IQ_{ab}I}{IQ_{zu}I}$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\varphi^{\chi} \cdot \psi - 1}{\varepsilon^{\chi-1} \cdot [\psi - 1 + \chi \cdot \psi \cdot (\varphi - 1)]}$$

mit:  $\varepsilon = \text{Verdichtungsverhältnis}$   $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$

Drucksteigerungsverhältnis:  $\psi = \frac{p_3}{p_2}$

Einspritzverhalten:  $\varphi = \frac{V_3}{V_2}$