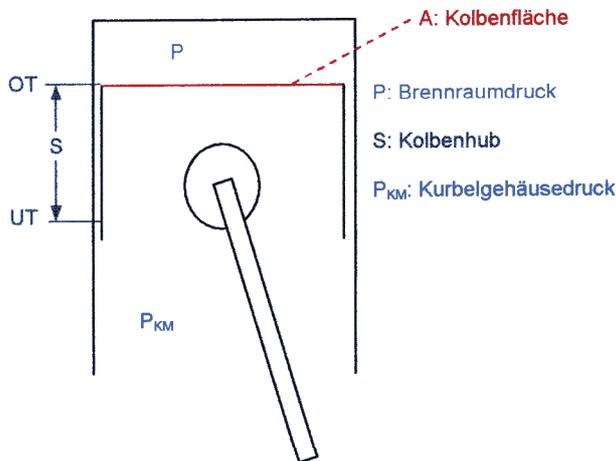


Motorische Kenngrößen:

a) Geometrie:



Hubraum eines einzelnen Zylinders:

$$V_h = A \cdot s = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot s$$

$$[V] = l = dm^3 = \frac{1}{1000} m^3 = 10^6 mm^3$$

Gesamthubraum des Motors:

$$V_H = z \cdot V_h = z \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot s$$

z: Zylinderzahl
 s: Kolbenhub

Hub- zu- Bohrungsverhältnis (s/d):

$$V_H = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot s = \frac{\pi}{4} \cdot d^3 \cdot \left(\frac{s}{d}\right)$$

Verdichtungsverhältnis:

$$\varepsilon = \frac{V_H + V_C}{V_C} = \frac{V_h + V_c}{V_c}$$

V_H: Hubraum aller Zylinder
 V_C: Verdichtungsraum aller Zylinder

Mittlere Kolbengeschwindigkeit:

$$v_m = 2 \cdot s \cdot n$$

$$[v_m] = \frac{m}{s}$$

s: Kolbenhub
 n: Drehzahl

b) Kraftstoff:

b1) Zylinderfüllung:

λ_a : Luftaufwand (Maß für die Ladung, die dem Motor real zugeführt wird gegenüber der theoret. möglichen Ladung)

$$\lambda_a = \frac{\text{ges. geförderte Frischladung je Arbeitsspiel}}{\text{Mechanisch mögl. Frischladung je Arbeitsspiel}}$$

$$\lambda_a = \frac{m_{ges}}{m_{theor}} = \frac{\dot{m}_{ges}}{\dot{m}_{theor}}$$

Ottomotor:

$$m_{ges} = m_L + m_{Kr}$$

Dieselmotor:

$$m_{ges} = m_L$$

Theoretischer Luftdurchsatz:

$$m_{th} = \rho_{th} \cdot V_H$$

mit: $\rho_{th} = \rho_0 = \frac{p_0}{R \cdot T}$ (Grunddichte im Umgebungszustand)

Ottomotor:

$$\lambda_a = \frac{\rho_G \cdot V_G}{\rho_G \cdot V_H} = \frac{V_G}{V_H}$$

V_G: Gemischvolumen

Dieselmotor:

$$\lambda_a = \frac{\rho_0 \cdot V_L}{\rho_0 \cdot V_H} = \frac{V_L}{V_H}$$

λ_l : Liefergrad (Maß für verbleibende Ladung nach Ladungswechsel)

$$\lambda_l = \frac{\text{tatsächliche Frischladung im Zylinder je Arbeitsspiel}}{\text{theoretisch mögliche Frischladung je Arbeitsspiel}}$$

$$\lambda_l = \frac{m_{tatsächlich}}{m_{theoretisch}}$$

$$m_{tats} = m_{ges} - m_{sp}$$

m_{sp}: Spülverluste

Ottomotor:

$$m_{tats} = m_{tats L} + m_{tats Kr}$$

Dieselmotor:

$$m_{tats} = m_{tats L}$$

λ_z : Fanggrad (verbleibende Frischladung im Zylinder nach auftretenden Spülverlusten)

- Maß für Spülverluste

$$\lambda_z = \frac{\text{tatsächliche Frischladung im Zylinder}}{\text{gesamte geförderte Frischladung}}$$

$$\lambda_z = \frac{m_{\text{tats}}}{m_{\text{ges}}} = \frac{\lambda_e}{\lambda_a}$$

λ_s : Spülgrad (verbleibendes Restgas im Zylinder)

- Maß für Restgasanteil für den Zylinder

$$\lambda_s = \frac{\text{tatsächliche Frischladung im Zylinder}}{\text{gesamte Masse im Zylinder}}$$

$$\lambda_s = \frac{m_{\text{tats}}}{m_{\text{tats}} + m_{\text{Rest}}}$$

λ_v : Verbrennungsluftverhältnis

$$\lambda_v = \frac{\text{tatsächliche Luftmasse im Zylinder}}{\text{Luftmasse bei stöchiometrischer Verbrennung}}$$

$$\lambda_v = \frac{m_{L \text{ tats}}}{m_{L \text{ stöch}}} = \frac{m_{L \text{ tats}}}{L_{\text{min}} - m_{Kr}}$$

L_{min} : Luftbedarf für stöchiometrische Verbrennung: (Mindestluftbedarf)

$$L_{\text{min}} = L_{\text{stöch}} = 14,7 \cdot \frac{\text{kg Luft}}{\text{kg Kraftstoff}}$$

$\lambda_v > 1$: Luftüberschuss; $\lambda_v < 1$: Luftmangel

Einspritzvolumen:

$$V_E = \frac{B_H}{\rho_G \cdot n_H \cdot i} \quad [n_H] = \frac{1}{h} \quad [B_H] = \frac{\text{kg}}{h}$$

g_{Kr}

b2) Kraftstoffverbrauch:

Gemischheizwert:

Ottomotor:

$$H_G = \frac{m_{Kr} \cdot H_u}{V_G}$$

$$H_G = \frac{H_u \cdot \rho_G}{\lambda_v \cdot L_{\text{min}} + 1}$$

V_G : Gemischvolumen, Zylinder nach ES
 m_{Kr} : Kraftstoffmasse im V_G
 m_G : Gemischmasse im Zylinder nach ES
 ρ_G : Gemischdichte im Zylinder nach ES
 ES: Einlass schließt

$$[H_G] = \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$$

$$H_G = \frac{w_v}{\eta_v}$$

H_G : Heizwert je m^3 Brennstoff-Luft-Gemisch
 H_u : unterer Heizwert in kJ/kg

$$\rho_G = \frac{H_G (\lambda_v \cdot L_{\text{min}} + 1)}{H_u} \quad V_G = \frac{m_{Kr} \cdot (\lambda_v \cdot L_{\text{min}} + 1)}{\rho_G}$$

$$V_G = \frac{m_G}{\rho_G} = \frac{m_{L \text{ tats}} + m_{Kr}}{\rho_G}$$

$$m_{L \text{ tats}} = \dot{m}_{Kr} \cdot L_{\text{min}} \cdot \lambda_v$$

$$L_{\text{min}} = L_{\text{stöch}} = 14,7 \cdot \frac{\text{kg Luft}}{\text{kg Kraftstoff}}$$

Dieselmotor:

$$\bar{H}_G = \frac{m_{Kr} \cdot H_u}{V_G}$$

$$\bar{H}_G = \frac{H_u \cdot \rho_L}{L_{\text{min}} \cdot \lambda_v}$$

$$V_G = \frac{m_G}{\rho_G} = \frac{m_{L \text{ tats}}}{\rho_L} = \frac{m_{Kr} \cdot L_{\text{min}} \cdot \lambda_v}{\rho_L}$$

Kraftstoffverbrauch:

effektiver spez. Kraftstoffverbrauch:

$$b_e = \frac{\dot{m}_{Kr}}{P_e} = \left[\frac{\text{g}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right] \quad (\text{auf Leistung bezogen})$$

$$\dot{m}_{Kr} = \text{Kraftstoffmassenstrom in } \left[\frac{\text{g}}{\text{h}} \right]$$

$$P_e = \text{effektive Leistung} = \dot{m}_{Kr} \cdot H_u \cdot \eta_e$$

$$b_e = \frac{1}{H_u \cdot \eta_e}$$

$$b_v = \frac{1}{H_u \cdot \eta_v}$$

[g/kWh]

stündlicher Verbrauch:

$$B_H = \underbrace{b_e}_{\left[\frac{\text{g}}{\text{kW} \cdot \text{h}} \right]} \cdot \underbrace{P_e}_{[\text{kW}]} = \left[\frac{\text{g}}{\text{h}} \right] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] \quad \dot{V}_{Kr} = \frac{\dot{m}_{Kr}}{\rho_{Kr}}$$

$$B_H = \dot{m}_{Kr}$$

Umrechnung:

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$$

Streckenverbrauch:

$$B_s = \frac{B_H \cdot 100}{\rho_K \cdot v} = \left[\frac{l}{100 \text{ km}} \right]$$

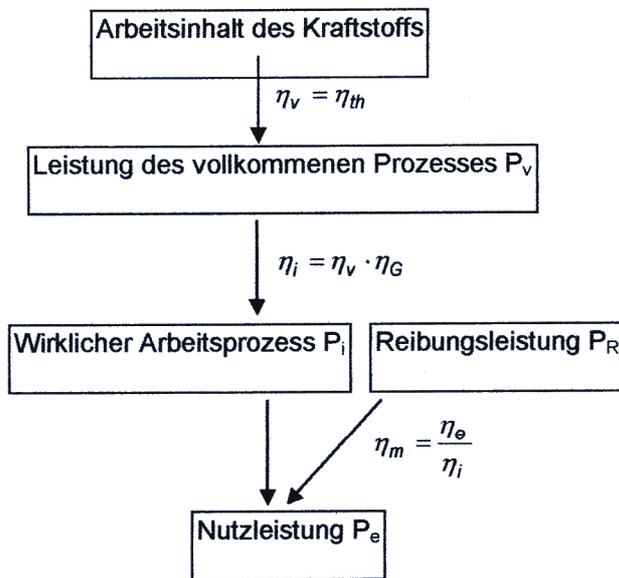
v = Geschwindigkeit in km/h

$$\frac{b_e \cdot P_e \cdot 100}{\rho_{Kr} \cdot v} = \left[\frac{l}{100 \text{ km}} \right]$$

ρ_{Kr} = Dichte des Kraftstoffes

c) Wirkungsgrade:

Zusammenhang:



Wirkungsgrad des vollkommenen Motors:

- erfasst alle phys. und chem. Effekte, die den Wirkungsgrad beeinflussen.

$$\eta_v = \frac{\text{Arbeit des vollkommenen Prozesses}}{\text{Arbeit sinh alt des zugeführten Kraftstoffs}}$$

Ottomotor: $\eta_v = f(\varepsilon, \lambda)$
 Dieselmotor: $\eta_v = f(\varepsilon, \lambda, p_{\max})$ } Diagramm

Gütegrad der Verbrennung:

- erfasst alle Verluste des realen Motors ohne die Verluste mechanischer Energie

$$\eta_G = \frac{\eta_i}{\eta_v} \quad \eta_G = \frac{P_i}{P_v} \left\{ \begin{array}{l} \text{Leistung aus Indikatordiagramm} \\ \text{vollkommene (ideale) Leistung} \end{array} \right.$$

innerer Wirkungsgrad (indiziert):

$$\eta_i = \frac{\text{Indizierte Arbeit am Kolben}}{\text{Arbeit sinh alt des zugeführten Kraftstoffs}}$$

$$\eta_i = \frac{W_i}{W_{Kr}} = \frac{P_i}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{P_i}{B \cdot H_u} \quad \text{B: Kraftstoffverbrauch}$$

$$\eta_i = \eta_v \cdot \eta_G$$

Mechanischer Wirkungsgrad:

$$\eta_m = \frac{w_e}{w_i} = \frac{p_e}{p_i} = \frac{\eta_e}{\eta_i}$$

$$\eta_m = \frac{w_e}{w_i} = \frac{w_e}{w_e + w_r} = \frac{1}{1 + \frac{w_r}{w_e}}$$

effektiver Wirkungsgrad:

- erfasst die Summe aller Verluste

$$\eta_e = \frac{\text{Nutzarbeit an der Kupplung}}{\text{Arbeit sinh alt des zugeführten Kraftstoffes}}$$

$$\eta_e = \frac{W_e}{W_{Kr}} = \frac{P_e}{\dot{Q}_{Kr}}$$

$$\eta_e = \frac{1}{H_u \cdot b_e}$$

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m$$

$$\eta_e = \eta_v \cdot \eta_G \cdot \eta_m$$

η_i : Innerer Wirkungsgrad
 η_m : Mechanischer Wirkungsgrad
 η_G : Gütegrad der Verbrennung

d) Arbeit:

Arbeit:

$$dW = F \cdot ds = p \cdot A \cdot ds = p \cdot dV$$

$$W = \int p \cdot dV$$

Hubraumarbeit:

$$W = p_m \cdot V_H$$

Mitteldruck:

$$p_m = \frac{W}{V_H} \quad [p_m] = \text{bar}$$

spez. Hubraumarbeit:

$$w = \frac{W}{V_H} \quad [w] = \frac{J}{m^3}$$

Umrechnungen:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 10^5 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}$$

$$1 \text{ Nm} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$$

Spez. Arbeit des vollkommenen Motors:

$$w_v = f(\varepsilon, \lambda) \rightarrow \text{Diagramm}$$

$$w_v = H_G \cdot \eta_v = \frac{\text{kJ}}{\text{dm}^3}$$

(Ottomotor)

$$w_v = \bar{H}_G \cdot \eta_v = \frac{\text{kJ}}{\text{dm}^3}$$

(Dieselmotor)

Spezifische innere Arbeit:

$$w_i = H_G \cdot \eta_v \cdot \eta_G \cdot \lambda_l$$

(Ottomotor)

$$w_i = \bar{H}_G \cdot \eta_v \cdot \eta_G \cdot \lambda_l$$

(Dieselmotor)

Effektive spez. Arbeit:

$$w_e = w_i - w_r$$

$$p_i = p_e + p_r$$

$$p_e = p_i - p_r$$

$$w_e = p_e = \frac{W_e}{V_H} = 10^{-1} \frac{\text{J}}{\text{cm}^3} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$w_e = H_G \cdot \eta_e \cdot \lambda_l$$

(Ottomotor)

$$w_e = \bar{H}_G \cdot \eta_e \cdot \lambda_l$$

(Dieselmotor)

$$w_e = \frac{W_e}{V_H}$$

$$w_e = \frac{P_e}{V_H \cdot i \cdot n}$$

$$w_e = H_G \cdot \eta_v \cdot \eta_G \cdot \eta_m \cdot \lambda_l$$

w_i ; p_i : spez. innere Arbeit; induzierter Mitteldruck

w_r ; p_r : spez. Reibungsarbeit; Reibmitteldruck

H_G : Gemischheizwert (Energie im Zylinder vor Verbrennung)

λ_l : Liefergrad

e) Leistung:

$$P = M \cdot \omega = F \cdot v = \frac{W}{t} = F \cdot \frac{s}{t}$$

$$P = \underbrace{w}_{\text{Kraft}} \cdot \underbrace{A \cdot s \cdot i \cdot n \cdot z}_{\text{Arbeit}}$$

mit: w : spez. Hubraumarbeit

$$A: \text{ Kolbenfläche } A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

s : Kolbenhub

i : Taktzahl

($i = 1$ bei Zweitaktern; $i = 0,5$ bei Viertaktern)

n : Drehzahl

z : Zylinderzahl

$$P = \frac{w}{\frac{\text{kJ}}{\text{dm}^3}} \cdot \frac{V_H}{\text{dm}^3} \cdot i \cdot \frac{n}{\frac{1}{s}} = [\text{kW}]$$

$$P_e = P_i - P_R$$

$$P_i = P_e + P_R$$

$$P_v = w_v \cdot V_H \cdot i \cdot n$$

$$P_i = w_i \cdot V_H \cdot i \cdot n$$

$$P_R = w_R \cdot V_H \cdot i \cdot n$$

$$P_e = w_e \cdot V_H \cdot i \cdot n$$

P_v : vollkommene Leistung

P_i : innere Leistung

P_R : Reibungsleistung

P_e : effektive Leistung

w : spez. Arbeit

V_H : Hubvolumen

i : 0,5 (Viertakt); 1 (Zweitakt)

n : Drehzahl

f) Drehmoment:

$$P_e = M \cdot \omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$$

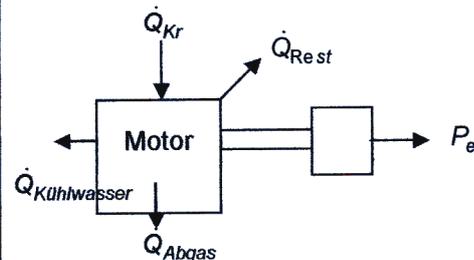
$$P_e = w_e \cdot V_H \cdot i \cdot n$$

→ gleichsetzen!

$$M = \frac{w_e \cdot V_H \cdot i}{2 \cdot \pi} = \frac{V_H \cdot i}{2 \cdot \pi} \cdot w_e$$

Motorkonstante

g) Energiebilanz:



$$\dot{Q}_{Kr} = P_e + \dot{Q}_{Kuehlw} + \dot{Q}_{Abgas} + \dot{Q}_{Rest}$$

mit:

$$\dot{Q}_{Kr} = \dot{m}_{Kr} \cdot H_u = \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$P_e = \eta_e \cdot \dot{m}_{kr} \cdot H_u$$

$$\dot{Q}_{Kuehlw} = \dot{m}_{Kuehlw} \cdot c_{Kuehlw} \cdot (T_{Kw \text{ Austritt}} - T_{Kw \text{ Eintritt}})$$

$$\dot{Q}_{Abgas} = \dot{m}_{Abgas} \cdot c_{p \text{ Abgas}} \int_{T_{Luft}}^{T_{Abgas}} (T_{Abgas} - T_{Luft})$$

$$\dot{Q}_{Rest} = \text{Korrekturfaktor} = 5 - 10\%$$