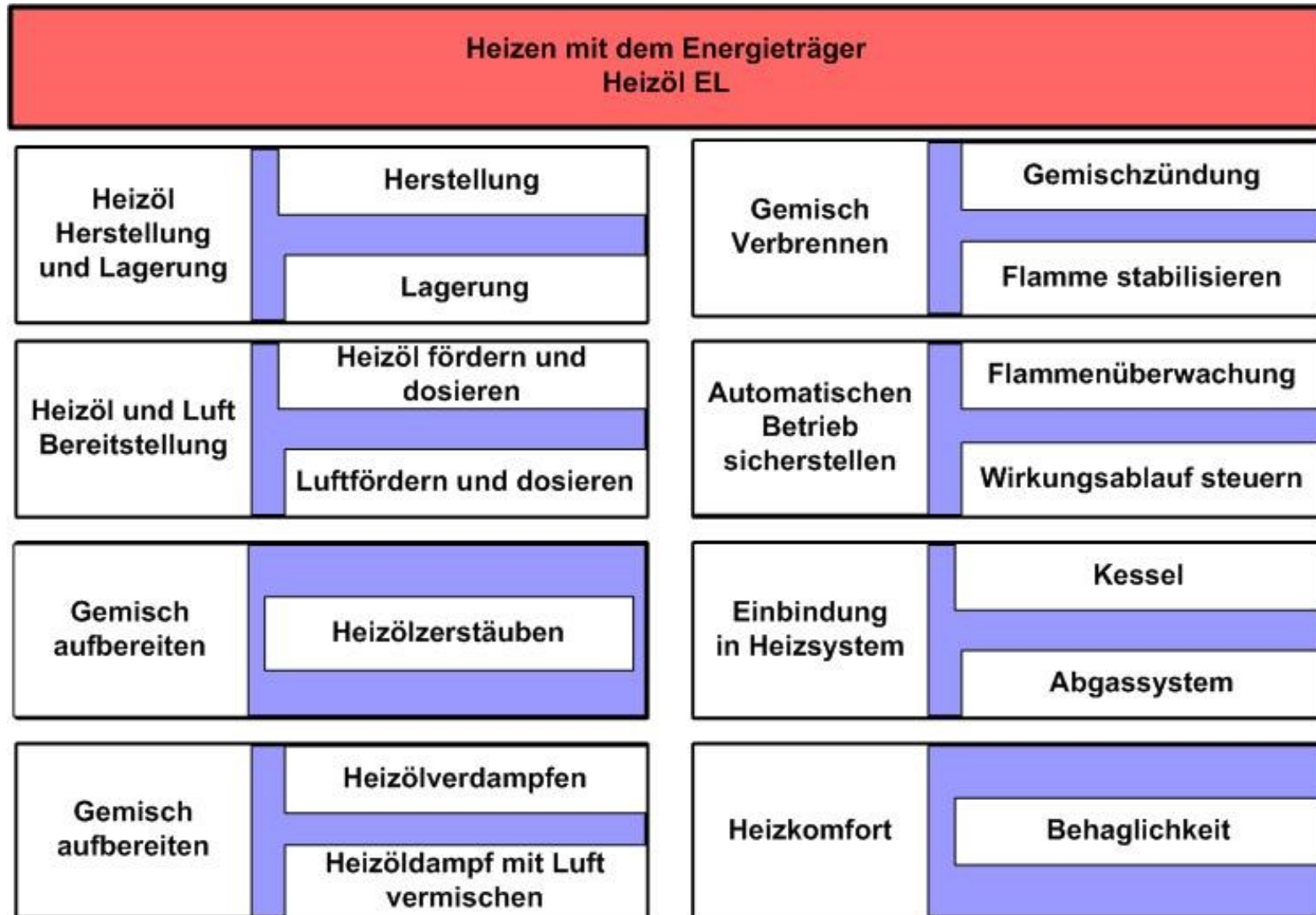


Angewandte Thermofluiddynamik

Dr.-Ing. F. v. Issendorff

Inhalte der Vorlesungen



Verbrennungsrechnung

Massenmäßige Zusammensetzung:

besteht das Gemisch aus 3 Komponenten

$$m = m_1 + m_2 + m_3$$

besteht das Gemisch aus k Komponenten

$$m = m_1 + m_2 + \dots = \sum_{i=1}^k m_i$$

Massenanteil der Komponente i

$$\xi_i = \frac{m_i}{m} = \frac{\text{Massen der Komponente } i}{\text{Gesamtmasse der Mischung}}$$

Für eine Mischung aus 3 Komponenten entsteht hieraus:

$$\underbrace{\frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3}}_m + \frac{m_2}{m} + \frac{m_3}{m} = \frac{m}{m}$$

$$\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 1$$

$$\sum_{i=1}^k \xi_i = 1$$

Molare Zusammensetzung:

besteht das Gemisch aus k Komponenten

$$n = \sum_{i=1}^k n_i$$

Molanteil der Komponente i

$$\psi_i = \frac{n_i}{n} = \frac{\text{Stoffmenge der Komponente } i}{\text{Gesamtstoffmenge der Mischung}}$$

$$\sum_{i=1}^k \psi_i = 1$$

Volumetrische Zusammensetzung:

besteht das Gemisch aus k Komponenten

$$V = \sum_{i=1}^k v_i$$

Raumanteil bzw. Volumenanteil der Komponente i

$$r_i = \frac{v_i}{V} = \frac{\text{Volumen der Komponente } i}{\text{Gesamtvolumen der Mischung}}$$

$$\sum_{i=1}^k r_i = 1$$

Dichte einer idealen Mischung:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^k r_i \cdot \rho_i$$

Molmasse einer idealen Mischung:

$$M_m = \sum_{i=1}^k r_i \cdot M_i$$

Gaskonstante einer idealen Mischung:

$$R_m = \sum_{i=1}^k \xi_i \cdot R_i$$

ρ_i Dichte der Komponente i

r_i Raumanteil der Komponente i

R_i Gaskonstante der Komponente i

Zusammenhang zwischen Massen- und Raumanteilen:

$$m_1 = \rho_1 \cdot V_1$$

$$m = \rho_m \cdot V$$

$$\frac{m_1}{m} = \frac{\rho_1}{\rho_m} \cdot \frac{V_1}{V}$$

$$\xi_{s1} = \frac{\rho_1}{\rho_m} \cdot r_i$$

Für das Verhältnis der Dichten:

$$\rho_m = \frac{M_m}{\bar{V}}$$

$$\rho_i = \frac{M_i}{\bar{V}}$$

$$\frac{\rho_i}{\rho_m} = \frac{M_i}{M_m}$$

$$\xi_{s1} = r_i \cdot \frac{M_i}{M_m}$$

\bar{V} Molvolumen der Komponente i

ρ_i Dichte der Komponente i

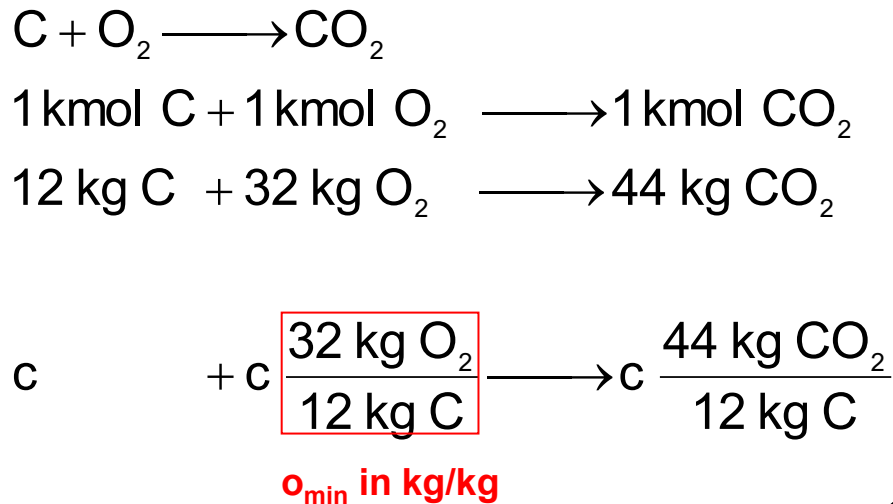
r_i Raumanteil der Komponente i

R_i Gaskonstante der Komponente i

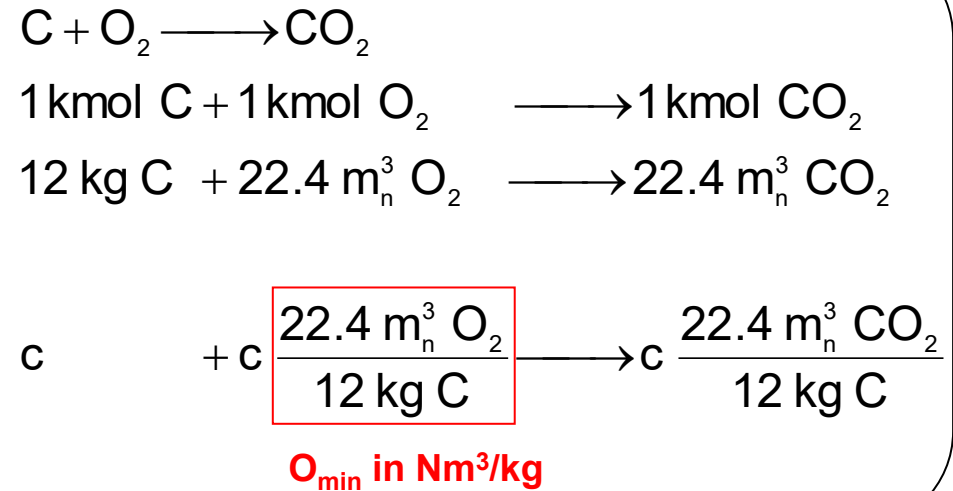
Verbrennungsrechnung

Verbrennung von C zu CO₂

Die Elementaranalyse wird durch die Massenanteile c gegeben



O_{\min} Mindestsauerstoffbedarf in kg/kg



O_{\min} Mindestsauerstoffbedarf in Nm³/kg

Verbrennungsrechnung

Verbrennung von C zu CO₂

Unter Berücksichtigung des Sauerstoffgehalts von 21 Vol.% bzw. 23.3 Mass. % in trockener Luft erhält man den Mindestluftbedarf:

$$I_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,232} \quad \frac{\frac{\text{kg } O_2}{\text{kg C}}}{\frac{\text{kg } O_2}{\text{kg Luft}}} = \frac{\text{kg Luft}}{\text{kg C}}$$

$$L_{\min} = \frac{O_{\min}}{0,21} \quad \frac{\frac{m_n^3 O_2}{\text{kg C}}}{\frac{m_n^3 O_2}{m_n^3 \text{Luft}}} = \frac{m_n^3 \text{Luft}}{\text{kg C}}$$

$$I = \lambda \cdot I_{\min}$$

$$L = \lambda \cdot L_{\min}$$

Der Rauchgasvolumen, das aus 1 kg Brennstoff entsteht, wird als spezifisches Rauchgasvolumen bezeichnet.

$$V_f = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2}$$

$$V_{\text{CO}_2} = c \frac{22.4}{12} \cdot \frac{m_n^3 \text{CO}_2}{\text{kg C}}$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot \lambda \cdot L_{\min} \quad V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{\min}$$

Verbrennungsgrößen

$CO_{2,max}$ Maximale CO_2 -Konzentration im Abgas ($\lambda = 1.0$) in Vol.%

$CO_{2,gem}$ Gemessene CO_2 -Konzentration im Abgas in Vol.%

V_{tr} Trockene Abgasmenge in m^3/kg oder m^3/m^3

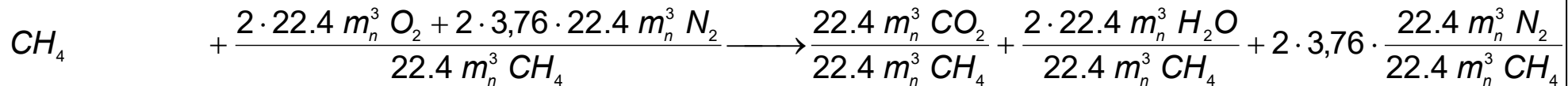
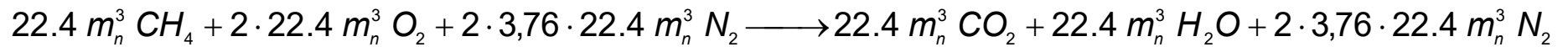
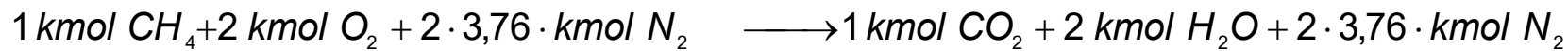
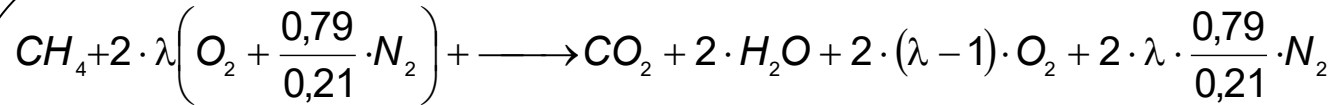
$V_{tr,min}$ Mindest trockene Abgasmenge in m^3/kg oder m^3/m^3

L_{min} Mindestluftbedarf in m^3/kg oder m^3/m^3

λ Luftzahl

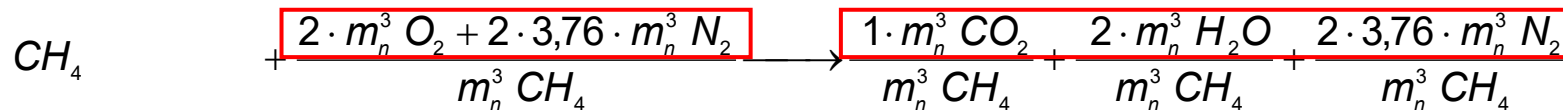
Verbrennungsrechnung

Verbrennung von CH₄ zu CO₂ + H₂O



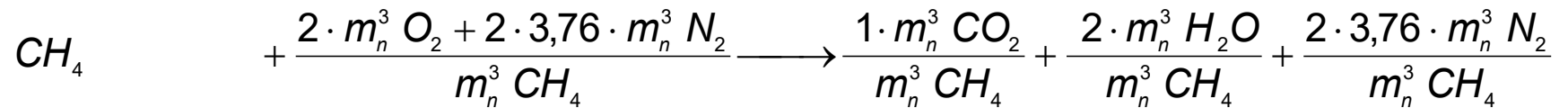
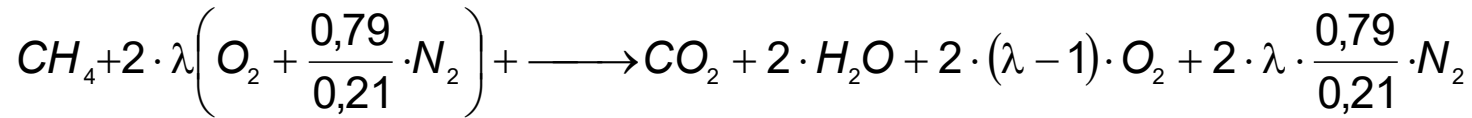
Luft

Abgas



$$\lambda = 1 \quad \Rightarrow \quad L_{\min}, V_{tr,\min}, V_{fe,\min}, CO_{2,\max}$$

Verbrennungsrechnung



$$L_{\min} = (2 \cdot + 2 \cdot 3,76) \frac{m_n^3 \text{Luft}}{m_n^3 CH_4} = \boxed{9,52 \frac{m_n^3 \text{Luft}}{m_n^3 CH_4}}$$

$$V_{fe.\min} = (1 \cdot + 2 + 2 \cdot 3,76) \frac{m_n^3 \text{Luft}}{m_n^3 CH_4} = \boxed{10,52 \frac{m_n^3 \text{Abgas, fe}}{m_n^3 CH_4}}$$

$$V_{tr.\min} = (1 \cdot + 2 \cdot 3,76) \frac{m_n^3 \text{Luft}}{m_n^3 CH_4} = \boxed{8,52 \frac{m_n^3 \text{Abgas, tr}}{m_n^3 CH_4}}$$

$$CO_{2,\max} = \frac{1 \cdot m_n^3 CO_2}{V_{tr.\min}} = \frac{1 m_n^3 CO_2}{8,52 m_n^3 \text{Abgas, tr}} = \boxed{11,7 \text{ Vol.}\%}$$

Verbrennungsrechnung

Bestimmung der Luftzahl aus den gemessenen O₂-Konzentration im Abgas

O₂-Bilanz:

$$V_{O_2} = O_{2,gem} \cdot V_{tr}$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{min} \quad ; \quad V_{tr} = V_{tr,min} + (\lambda - 1) \cdot L_{min}$$

$$0,21 \cdot (\lambda - 1) \cdot L_{min} = O_{2,gem} \cdot [V_{tr,min} + (\lambda - 1) \cdot L_{min}] \quad / L_{min} \cdot O_{2,gem}$$

$$(\lambda - 1) \cdot \frac{0,21}{O_{2,gem}} = \frac{V_{tr,min}}{L_{min}} + (\lambda - 1)$$

$$(\lambda - 1) \cdot \left[\frac{0,21}{O_{2,gem}} - 1 \right] = \frac{V_{tr,min}}{L_{min}}$$

$$\lambda = \frac{V_{tr,min}}{L_{min}} \cdot \left[\frac{O_{2,gem}}{0,21 - O_{2,gem}} \right] + 1$$

Verbrennungsrechnung

Bestimmung der Luftzahl aus den gemessenen CO_2 -Konzentration im Abgas

CO_2 -Bilanz:

$$V_{\text{CO}_2} = \text{CO}_{2,\text{gem}} \cdot V_{tr}$$

$$\text{CO}_{2,\text{max}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{tr,\text{min}}} \quad ; \quad \text{CO}_{2,\text{gem}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{tr}}$$

$$V_{tr} = V_{tr,\text{min}} + (\lambda - 1) \cdot L_{\text{min}}$$

$$\frac{\text{CO}_{2,\text{max}}}{\text{CO}_{2,\text{gem}}} = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{tr,\text{min}}} \cdot \frac{V_{tr}}{V_{\text{CO}_2}} = \frac{V_{tr}}{V_{tr,\text{min}}}$$

$$V_{tr} = V_{tr,\text{min}} + (\lambda - 1) \cdot L_{\text{min}}$$

$$\frac{\text{CO}_{2,\text{max}}}{\text{CO}_{2,\text{gem}}} = \frac{V_{tr,\text{min}} + (\lambda - 1) \cdot L_{\text{min}}}{V_{tr,\text{min}}}$$

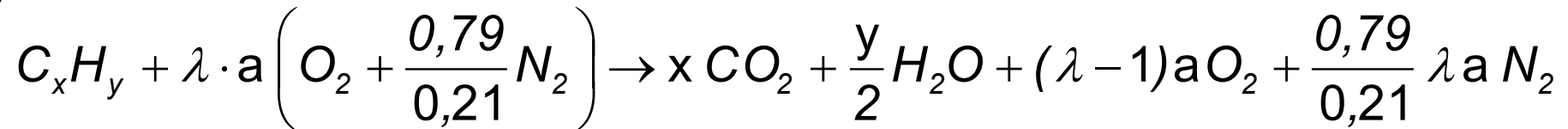
$$\frac{\text{CO}_{2,\text{max}}}{\text{CO}_{2,\text{gem}}} = 1 + (\lambda - 1) \cdot \frac{L_{\text{min}}}{V_{tr,\text{min}}}$$

$$(\lambda - 1) = \frac{\text{CO}_{2,\text{max}}}{\text{CO}_{2,\text{gem}}} \cdot \frac{V_{tr,\text{min}}}{L_{\text{min}}} - \frac{V_{tr,\text{min}}}{L_{\text{min}}}$$

$$\lambda = \frac{V_{tr,\text{min}}}{L_{\text{min}}} \cdot \left[\frac{\text{CO}_{2,\text{max}}}{\text{CO}_{2,\text{gem}}} - 1 \right] + 1$$

Allgemeine Reaktionsgleichung

Allgemeine Form der globalen Reaktionsgleichung für Kohlenwasserstoff-Verbrennung (für $\lambda \geq 1$)



$$a = x + \frac{y}{4}$$

Für die benötigte Luftmenge $L = n_L / n_B$ folgt:

$$L_{min} = \left(1 + \frac{0,79}{0,21} \right) \cdot a \qquad L = \lambda \cdot \left(1 + \frac{0,79}{0,21} \right) \cdot a$$

Mithilfe obiger Gleichung kann für vollständige Verbrennung auch die entstehende **Abgasmenge und ihre Zusammensetzung** berechnet werden.

Massenbilanz:

\dot{m}_L Luftmassenstrom in kg/s

\dot{m}_{Br} Brennstoffmassenstrom in kg/s

\dot{m}_{AG} Abgasmassenstrom in kg/s



Energiebilanz:

\dot{H}_L Luft-Enthalpiestrom in kW

\dot{H}_{Br} Brennstoff-Enthalpiestrom in kW

\dot{H}_{AG} Abgas-Enthalpiestrom in kW



Verbrennungsrechnung



$$\dot{m}_L + \dot{m}_{Br} = \dot{m}_{AG}$$

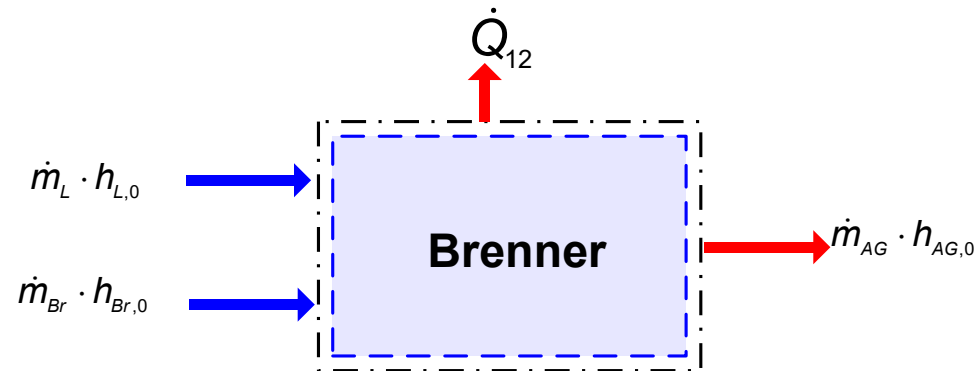
$$\dot{m}_L = \dot{m}_{Br} \cdot \lambda \cdot l_{\min}$$

$$\dot{m}_{AG} = \dot{m}_{Br} \cdot (1 + \lambda \cdot l_{\min})$$

l_{\min} in $\frac{\text{kg}_{\text{Luft}}}{\text{kg}_{\text{Brennstoff}}}$

Mindestluftbedarf

Verbrennungsrechnung

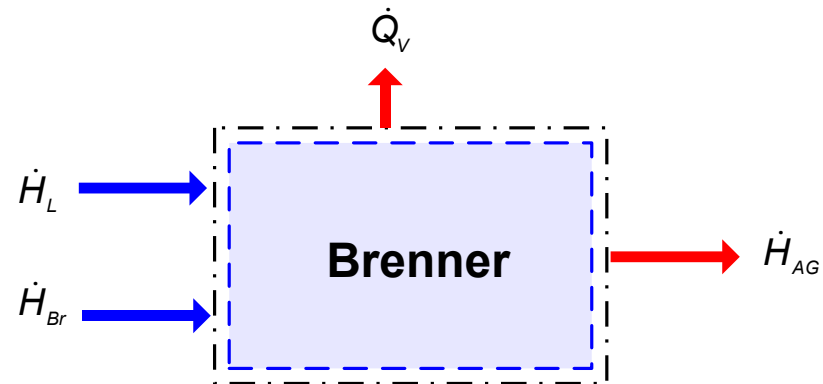


$$\dot{m}_{Br} \cdot h_{Br,0} + \dot{m}_L \cdot h_{L,0} = \dot{m}_{AG} \cdot h_{AG,0} + \dot{Q}_{12}$$

$$h_{Br,0} + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{Br}} \cdot h_{L,0} - \frac{\dot{m}_{AG}}{\dot{m}_{Br}} \cdot h_{AG,0} = \frac{\dot{Q}_{12}}{\dot{m}_{Br}}$$

$$H_u = h_{Br,0} + \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{Br}} \cdot h_{L,0} - \frac{\dot{m}_{AG}}{\dot{m}_{Br}} \cdot h_{AG,0}$$

unterer Heizwert $H_u = h_{Br,0} + \lambda \cdot I_{min} \cdot h_{L,0} - (1 + \lambda \cdot I_{min}) \cdot h_{AG,0}$



$$\dot{H}_L + \dot{H}_{Br} = \dot{H}_{AG} + \dot{Q}_v$$

$$\dot{H}_L = \underbrace{\dot{m}_{Br} \cdot \lambda \cdot l_{min}}_{\dot{m}_L} \cdot c_{p,L} \Big|_{T_o}^{T_L} (T_L - T_o)$$

$$\dot{H}_{Br} = \dot{m}_{Br} \cdot \left(H_u + c_{p,Br} \Big|_{T_o}^{T_{Br}} (T_{Br} - T_o) \right)$$

$$\dot{H}_{AG} = \dot{m}_{AG} \cdot c_{p,AG} \Big|_{T_o}^{T_{AG}} (T_{AG} - T_o)$$

$$c_p|_{T_1}^{T_2} = \frac{c_p|_{T_0}^{T_2}(T_2 - T_0) - c_p|_{T_0}^{T_1}(T_1 - T_0)}{(T_2 - T_1)}$$

Die mittleren spezifischen Wärmekapazitäten sind zwischen den Temperaturen T_0 und T tabelliert. Meist ist die Bezugstemperatur $T_0 = 273 \text{ K}$ bzw. 0°C

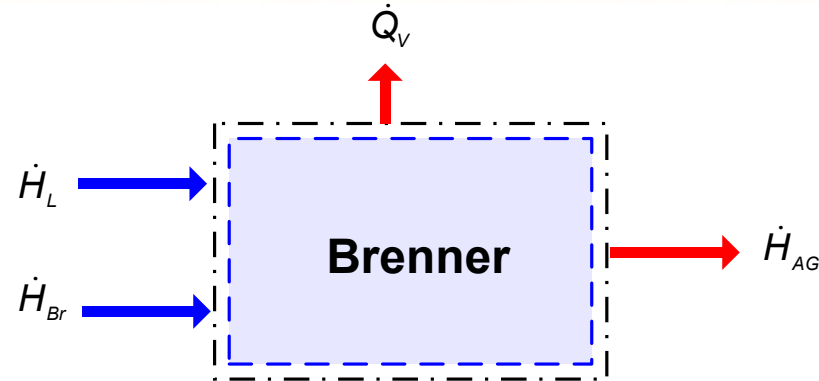
$$c_p|_{T_1}^{T_2} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT}{T_2 - T_1}$$

Für numerische Verbrennungsrechnungen wird heutzutage ein Polynomansatz mit 5 empirischen Parametern verwendet .

$$c_p(T) / R = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4$$

Thermochemical Database THERMDAT: <ftp://ftp.technion.ac.il/pub/supported/aetdd/thermodynamics>

Verbrennungsrechnung

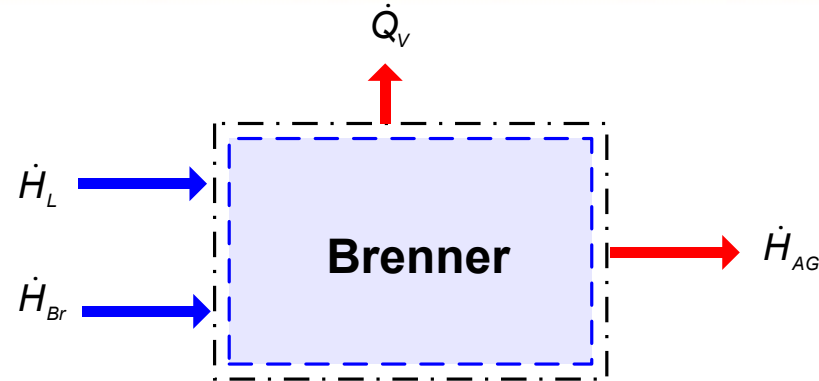


$$\dot{H}_L + \dot{H}_{Br} = \dot{H}_{AG} + \dot{Q}_V$$

$$\underbrace{\dot{m}_{Br} \cdot \lambda \cdot I_{min} \cdot c_{p,L} \Big|_{T_o}^{T_L} (T_L - T_o)}_{\dot{H}_L} + \underbrace{\dot{m}_{Br} \cdot \left(H_u + c_{p,Br} \Big|_{T_o}^{T_{Br}} (T_{Br} - T_o) \right)}_{\dot{H}_{Br}} = \underbrace{\dot{m}_{AG} \cdot c_{p,AG} \Big|_{T_o}^{T_{AG}} (T_{AG} - T_o)}_{\dot{H}_{AG}} + \dot{Q}_V$$

$$T_{AG} = \frac{\lambda \cdot I_{min} \cdot c_{p,L} \Big|_{T_o}^{T_L} \cdot (T_L - T_o) + H_u + c_{p,Br} \Big|_{T_o}^{T_{Br}} \cdot (T_{Br} - T_o) + \frac{\dot{Q}_V}{\dot{m}_{Br}}}{(1 + \lambda \cdot I_{min}) \cdot c_{p,AG} \Big|_{T_o}^{T_{AG}}} + T_o$$

Verbrennungsrechnung



Keine Luftvorwärmung

Keine Brennstoffvorwärmung

= 0
Keine Verluste

$$T_{AG} = \frac{\underbrace{\lambda \cdot I_{min} \cdot c_{p,L} \Big|_{T_o}^{T_L} \cdot (T_L - T_o)}_{=0} + H_u + \underbrace{c_{p,Br} \Big|_{T_o}^{T_{Br}} \cdot (T_{Br} - T_o)}_{=0} - \cancel{\frac{\dot{Q}_v}{\dot{m}_{Br}}}}{(1 + \lambda \cdot I_{min}) \cdot c_{p,AG} \Big|_{T_o}^{T_{AG}}} + T_o$$



$$T_{AG} = \frac{H_u}{(1 + \lambda \cdot I_{min}) \cdot c_{p,AG} \Big|_{T_o}^{T_{AG}}} + T_o$$

c_p vom Heizöl EL = 1,76 kJ/kg.K

Bestimmung der Verbrennungswärme

Auf der Grundlage des I. Hauptsatzes der Thermodynamik

$$\Delta u = q + w$$

Führt man einem System von außen die Wärmemenge q zu, so kann ein Teil der Wärmemenge Arbeit w verrichten ($w < 0$). Der Rest von q führt zu einer Erhöhung der inneren Energie U .

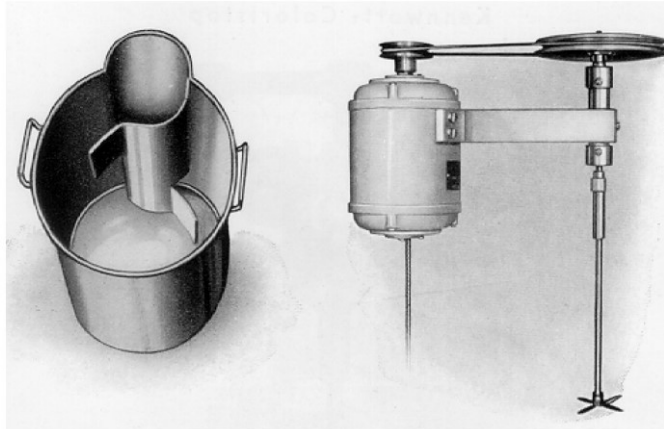
Mit einem Kalorimeter wird die Änderung der Temperatur - gemessen und ausgewertet.

Eine eingewogene Eichsubstanz (z. B. Benzoesäure) ist in der kalorimetrischen Bombe zu verbrennen. Die dabei auftretende Änderung der Temperatur ist in Abhängigkeit von der Zeit aufzunehmen ($\Delta T = f(t) \rightarrow$ Temperaturperiode); mit Hilfe der für die Eichsubstanz bekannten Verbrennungsenergie ist das Energieäquivalent des Kalorimeters zu berechnen.

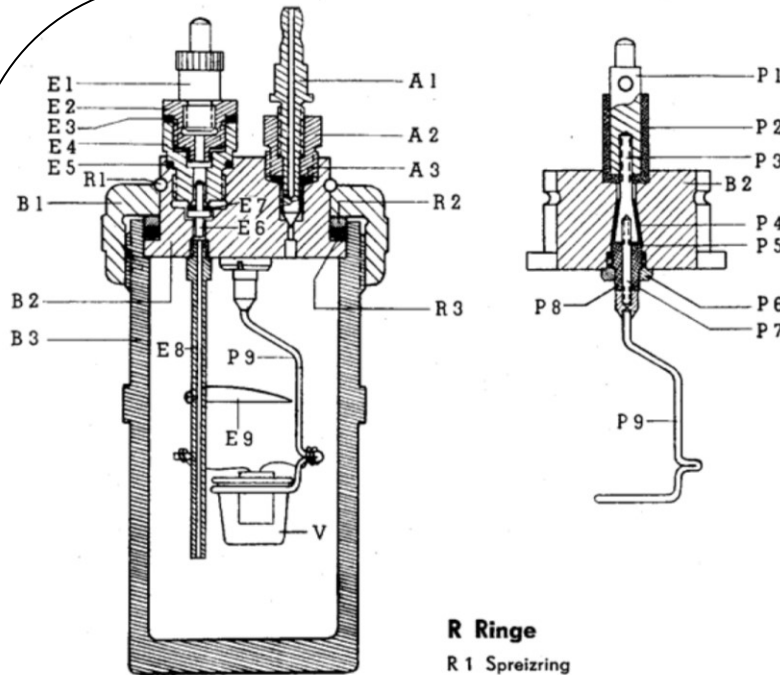
Eine eingewogene Menge einer unbekannt Substanz ist in analoger Weise zu verbrennen und die dabei auftretende Temperaturperiode aufzunehmen; mit Hilfe der Wärmekapazität des Kalorimeters sind die spezifische Verbrennungsenergie, und der untere sowie obere Heizwert zu berechnen.

($\Delta_v U$ für Benzoesäure - 3251 kJ mol⁻¹)

Die Kalorimetrische Bombe



Kalorimeterkessel und Rührer



E Teile des Einlaßventiles

- E 1 Verschußschraube mit Kontakt
- E 2 Filter-Einsatz
- E 3 Dichtungsring
- E 4 Ventilgehäuse
- E 5 Dichtungsring
- E 6 Ventiltippel
- E 7 Dichtungsscheibe
- E 8 Einlaßrohr
- E 9 Wärmeverteiler

A Teile des Auslaßventiles

- A 1 Ventilschraube
- A 2 Ventilmutter
- A 3 Dichtungsring

R Ringe

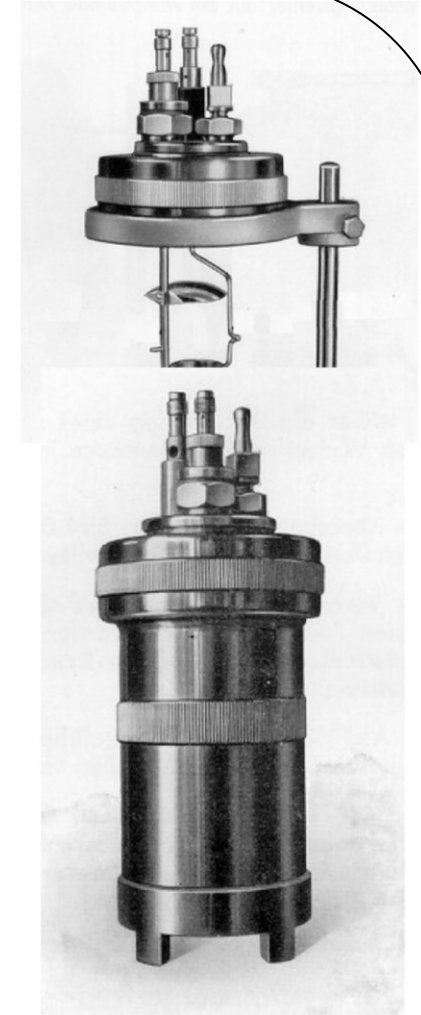
- R 1 Spreizring
- R 2 Druckring
- R 3 Dichtungsring

P Teile des isolierten Poles

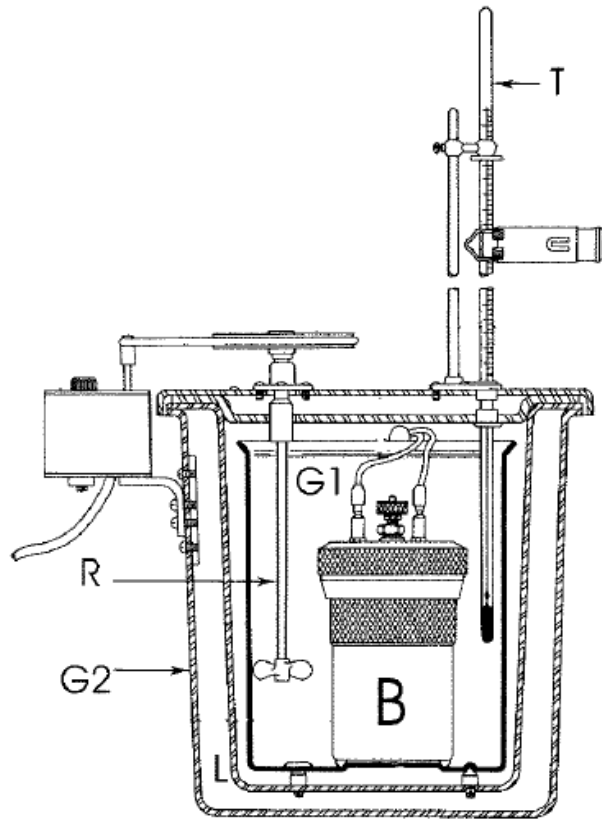
- P 1 Polverschraubung
- P 2 Isolier-Manschette
- P 3 Polkern mit Konus
- P 4 Isolier-Konus
- P 5 Kleine Isolierscheibe
- P 6 Polfassung
- P 7 Gewindedübel
- P 8 Keramische Buchse
- P 9 Poldraht mit Schälchenhalter

B Teile der Bombe

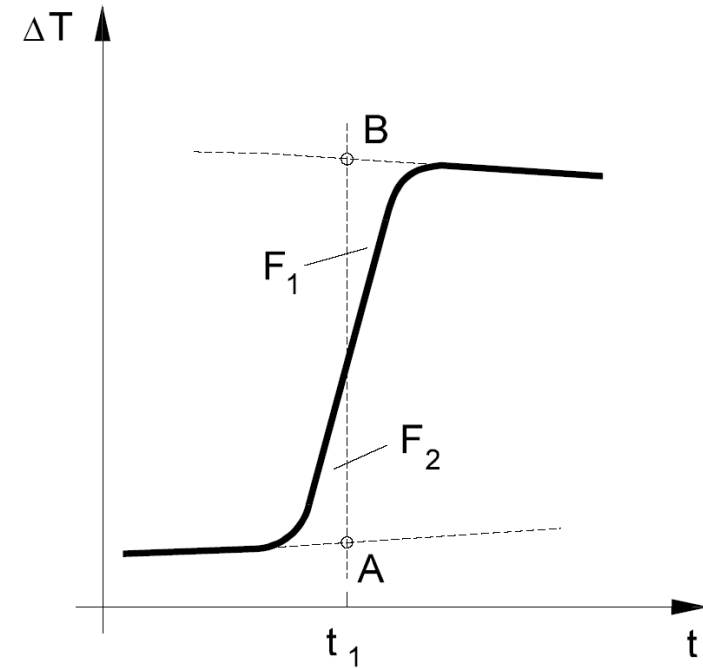
- B 1 Überwurfmutter
- B 2 Verschußkopf
- B 3 Gefäß



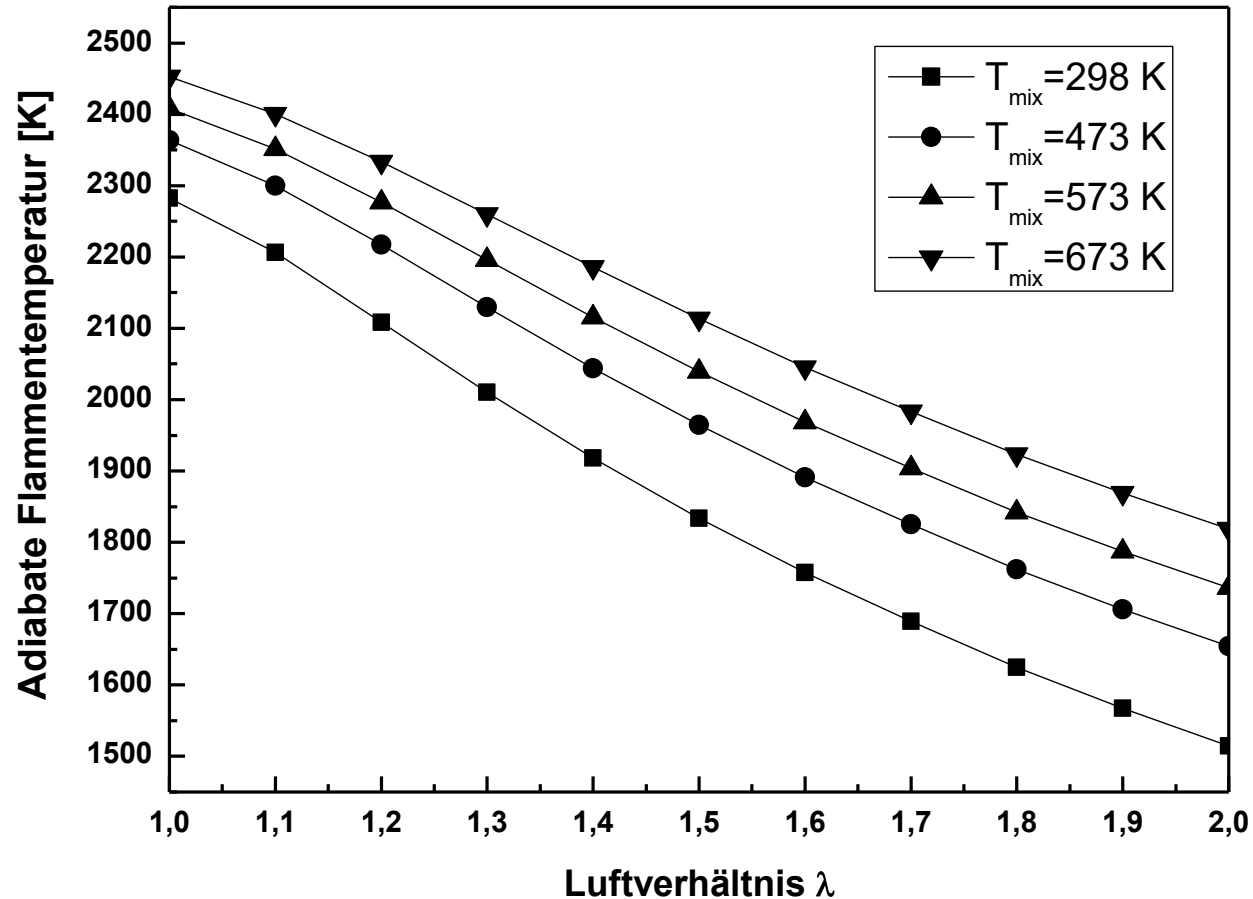
Bestimmung der Verbrennungswärme



- T: Thermometer
- R: Rührer
- L: Luftmantel
- B: Kalorimetrische Bombe

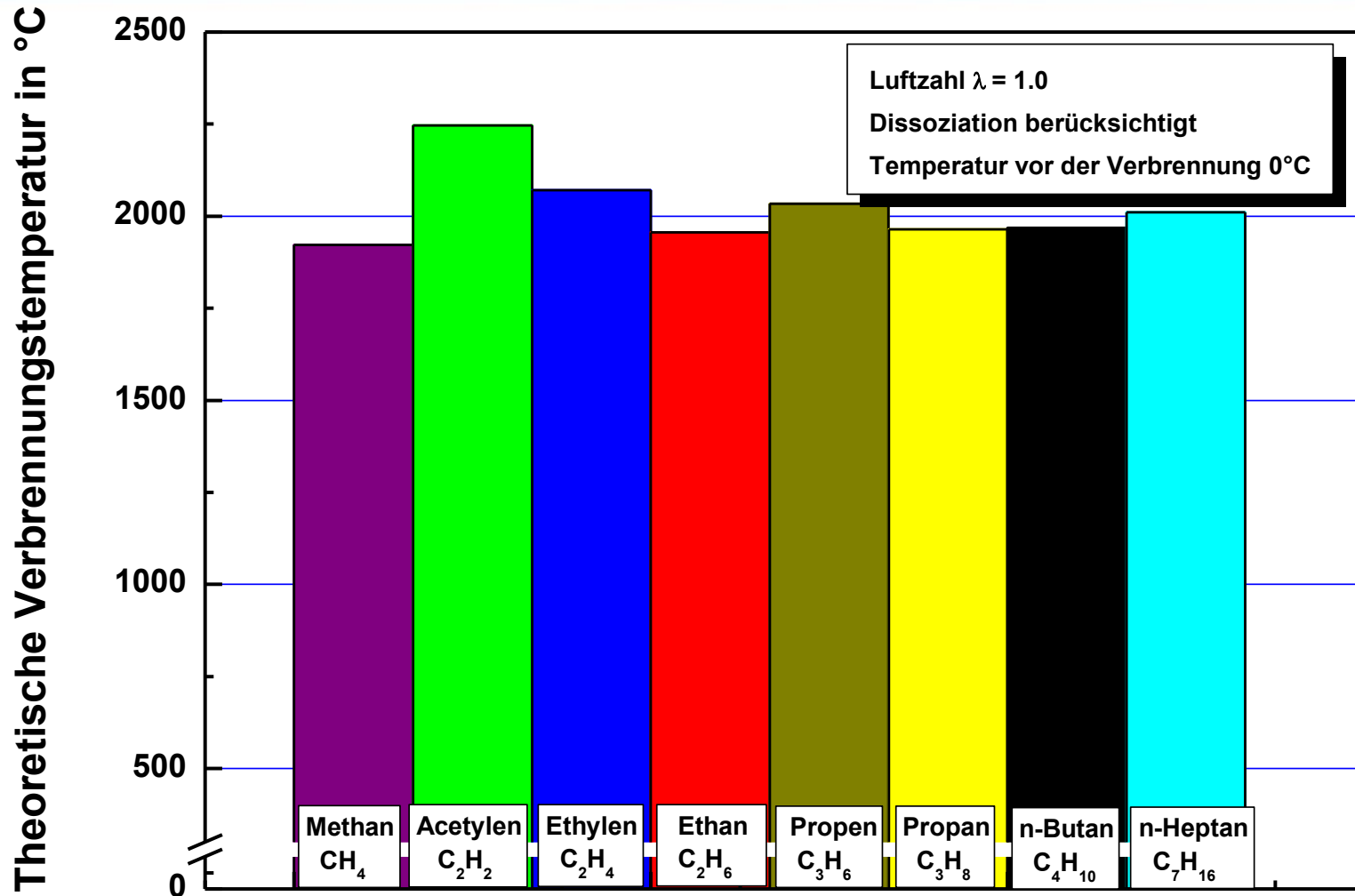


$$q = C_{Kal} \cdot (T_B - T_A) = C_{Kal} \cdot \Delta T$$



Adiabate Flammentemperatur von n-Heptan in Abhängigkeit von Luftvorwärmtemperaturen und Luftzahlen berechnet mit dem CHEMKIN Modul Equil

Verbrennungsrechnung



Adiabate Flammentemperatur verschiedener Kohlenwasserstoffe