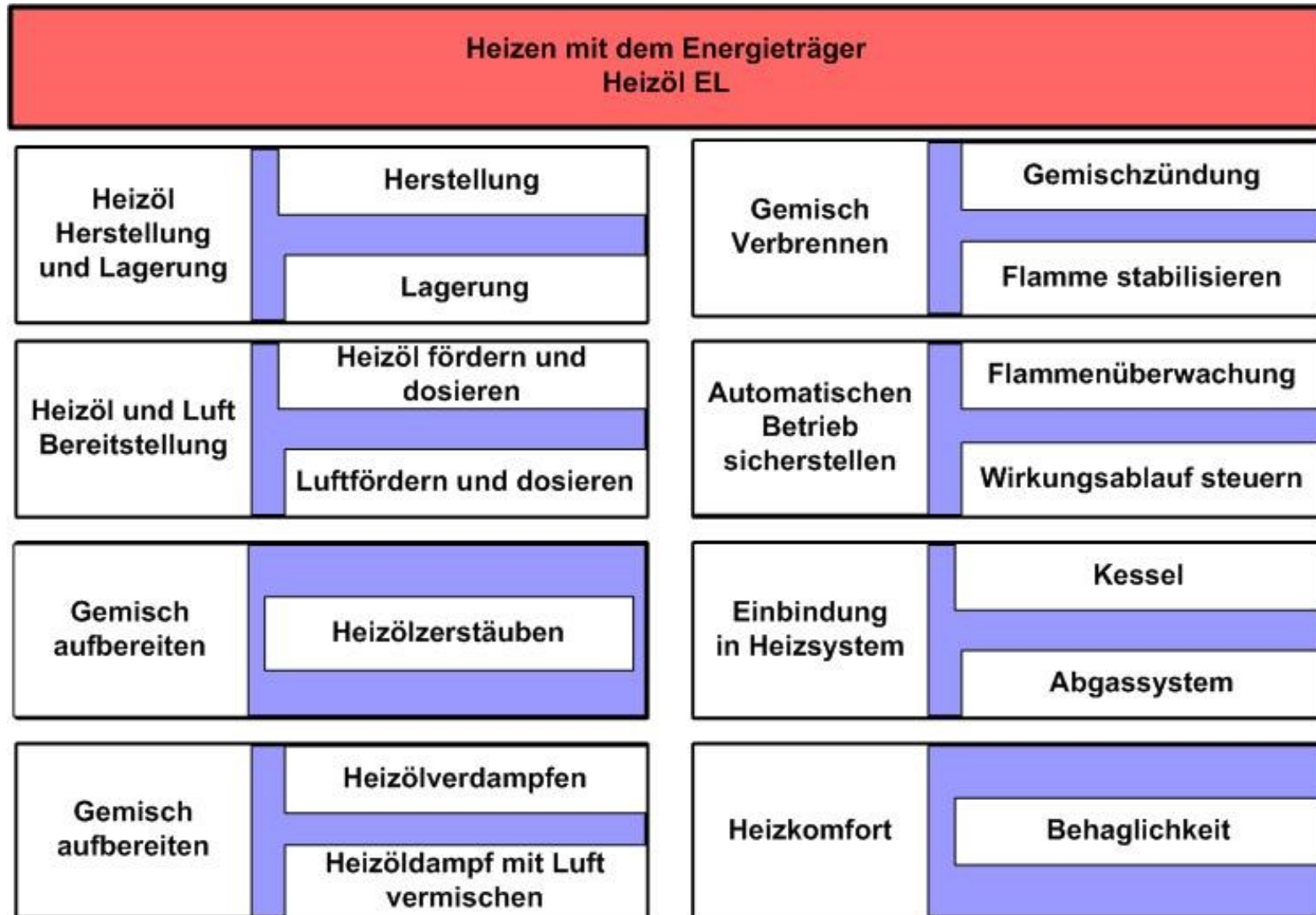


Angewandte Thermofluiddynamik

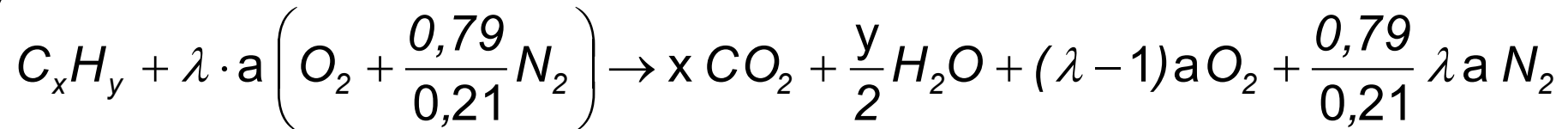
Dr.-Ing. F. v. Issendorff

Inhalte der Vorlesungen



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.

Verbrennungsgrößen (bisher)

$O_{2,min}$ Mindestsauerstoffbedarf in m^3/kg oder m^3/m^3

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

λ Luftzahl

H_u unterer Heizwert MJ/kg

Verbrennungsgrößen (weitere)

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

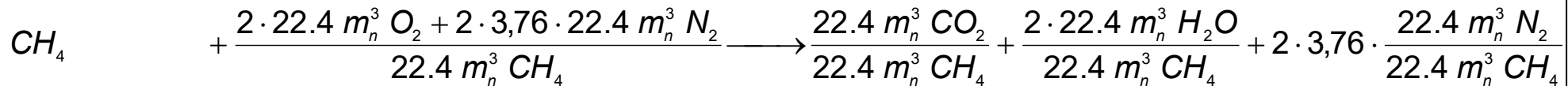
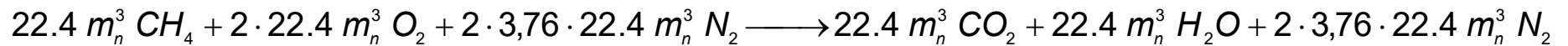
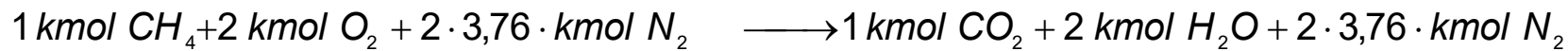
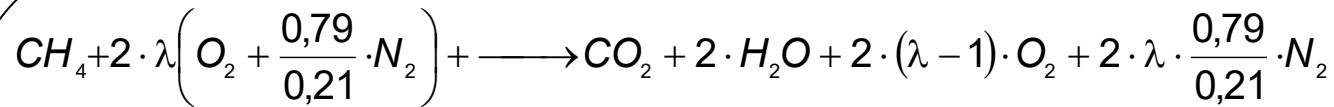
$CO_{2,gem}$ Gemessene CO_2 -Konzentration im Abgas in Vol.%

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

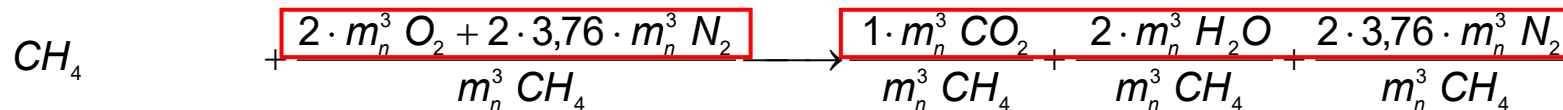
Verbrennungsrechnung

Verbrennung von CH₄ zu CO₂ + H₂O



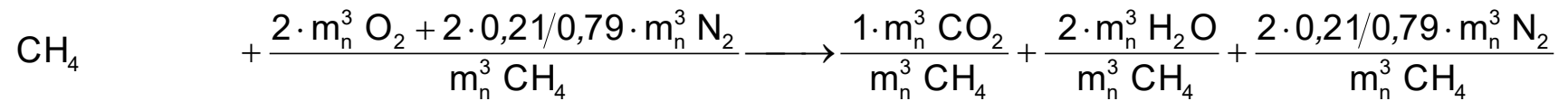
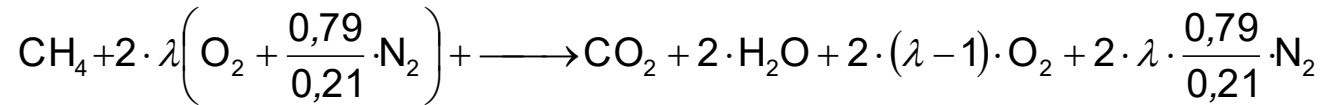
Luft

Abgas



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

Verbrennungsrechnung



$$L_{\min} = \left(2 + 2 \cdot \frac{0,79}{0,21} \right) \frac{m_n^3 \text{Luft}}{m_n^3 \text{CH}_4} = 9,52 \frac{m_n^3 \text{Luft}}{m_n^3 \text{CH}_4}$$

$$V_{\text{fe},\min} = \left(1 + 2 + 2 \cdot \frac{0,79}{0,21} \right) \frac{m_n^3 \text{Luft}}{m_n^3 \text{CH}_4} = 10,52 \frac{m_n^3 \text{Abgas, fe}}{m_n^3 \text{CH}_4}$$

$$V_{\text{tr},\min} = \left(1 + 2 \cdot \frac{0,79}{0,21} \right) \frac{m_n^3 \text{Luft}}{m_n^3 \text{CH}_4} = 8,52 \frac{m_n^3 \text{Abgas, tr}}{m_n^3 \text{CH}_4}$$

$$\text{CO}_{2,\max} = \frac{1 \cdot m_n^3 \text{CO}_2}{V_{\text{tr},\min}} = \frac{1 m_n^3 \text{CO}_2}{8,52 m_n^3 \text{Abgas, tr}} = 11,7 \text{ Vol.}\%$$

Verbrennungsrechnung

Bestimmung der Luftzahl aus der 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 der gemessenen CO₂-Konzentration im trockenen Abgas

CO₂-Bilanz:

$$V_{CO_2} = CO_{2,gem} \cdot V_{tr}$$

$$CO_{2,max} = \frac{V_{CO_2}}{V_{tr,min}} \quad ; \quad CO_{2,gem} = \frac{V_{CO_2}}{V_{tr}}$$

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

$$\frac{CO_{2,max}}{CO_{2,gem}} = \frac{V_{CO_2}}{V_{tr,min}} \cdot \frac{V_{tr}}{V_{CO_2}} = \frac{V_{tr}}{V_{tr,min}}$$

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

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

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

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

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

Massenbilanz:

\dot{m}_L Luftmassenstrom in kg/s

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

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



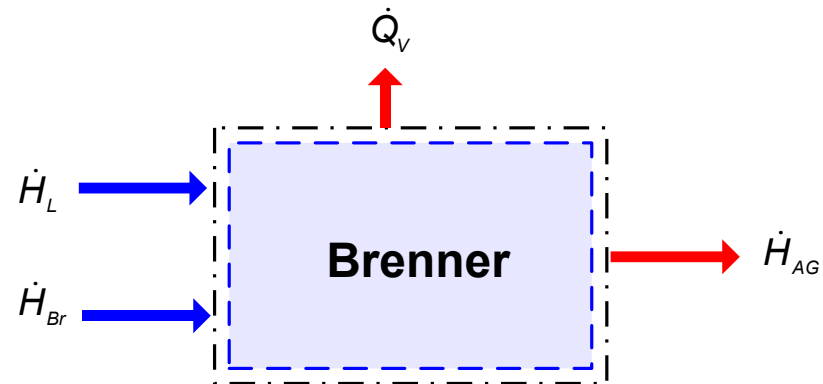
Energiebilanz:

\dot{H}_L Luft-Enthalpiestrom in kW

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

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





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

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

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

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

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

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

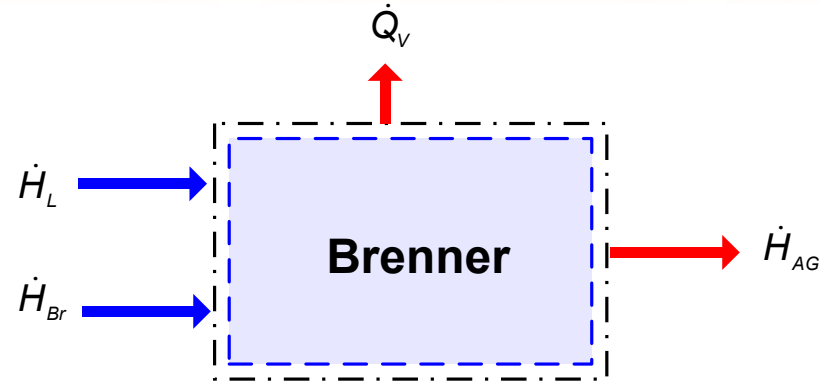
$$c_p|_{T_1}^{T_2} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT}{T_2 - T_1}$$

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

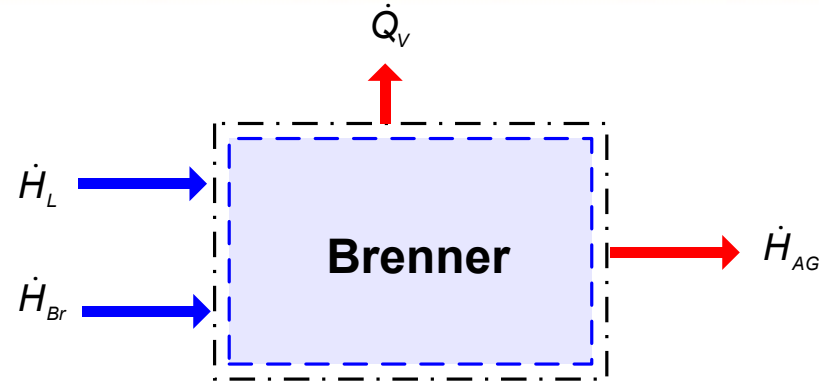


$$\dot{H}_L + \dot{H}_{Br} = \dot{H}_{AG} + \dot{Q}_V$$

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

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

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 .

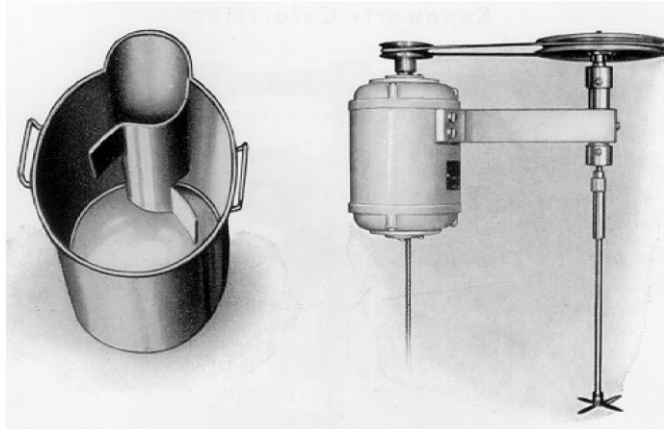
Mit einem Kalorimeter wird die Änderung der Temperatur - gemessen und ausgewertet.

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.

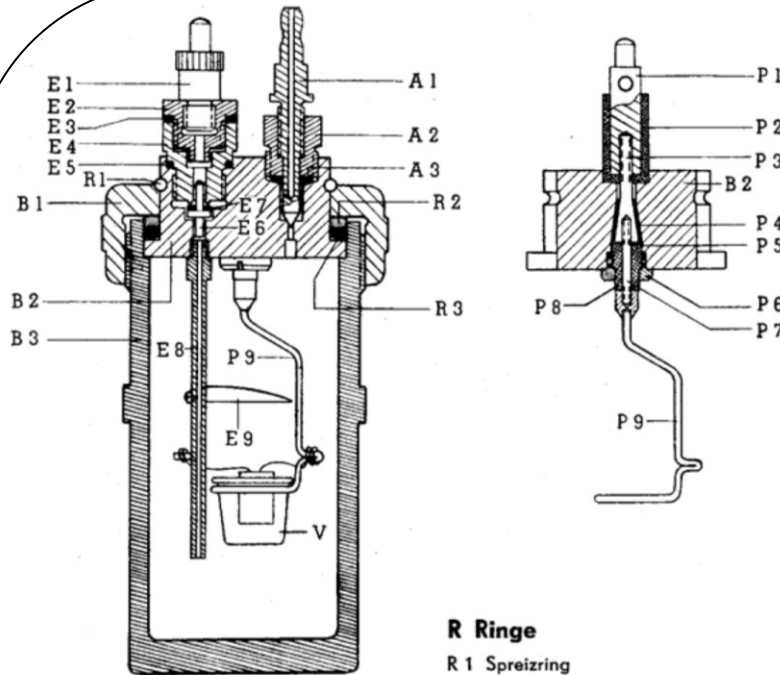
Eine eingewogene Menge einer unbekannt Substanz ist in analoger Weise zu verbrennen und die dabei auftretende Temperaturperiode aufzunehmen; mit Hilfe der Wärmekapazität des Kalorimeters sind die spezifische Verbrennungsenergie, und der untere sowie obere Heizwert zu berechnen.

($\Delta_v U$ 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

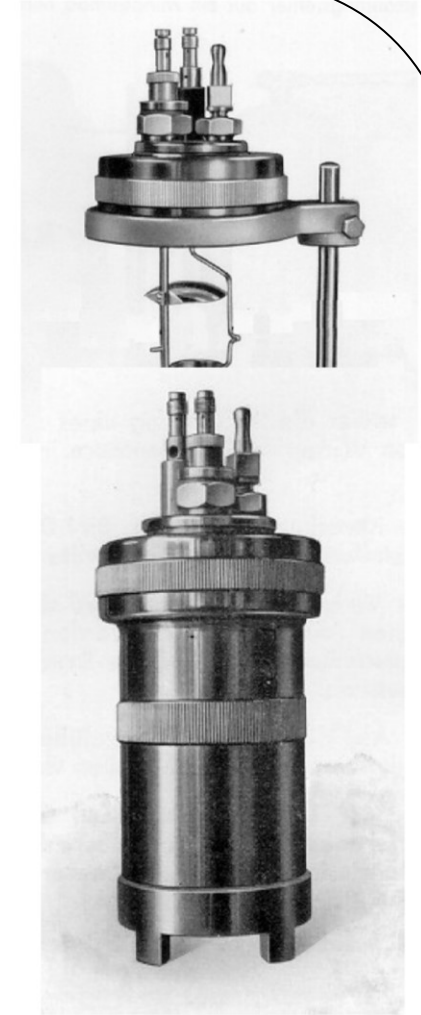
- R 1 Spreizring
- R 2 Druckring
- R 3 Dichtungsring

P Teile des isolierten Poles

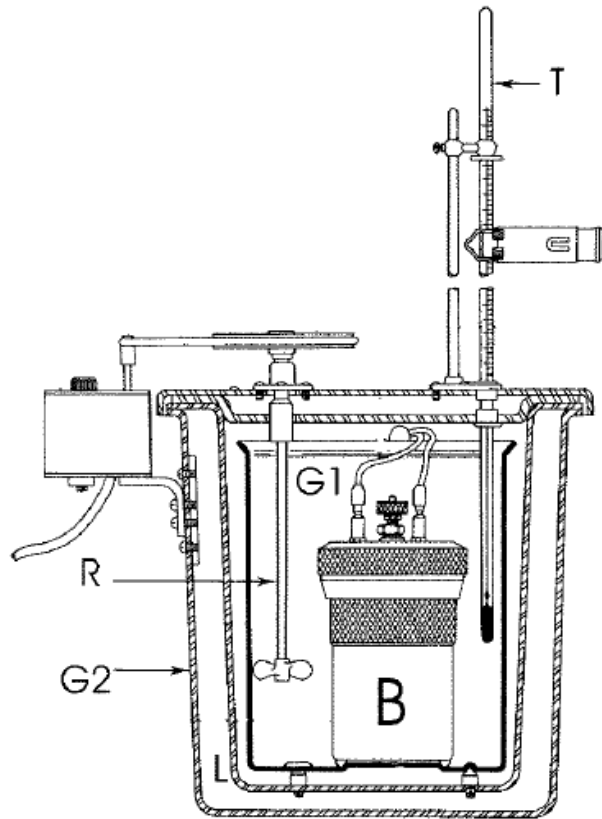
- P 1 Polverschraubung
- P 2 Isolier-Manschette
- P 3 Polkern mit Konus
- P 4 Isolier-Konus
- P 5 Kleine Isolierscheibe
- P 6 Polfassung
- P 7 Gewindedübel
- P 8 Keramische Buchse
- P 9 Poldraht mit Schälchenhalter

B Teile der Bombe

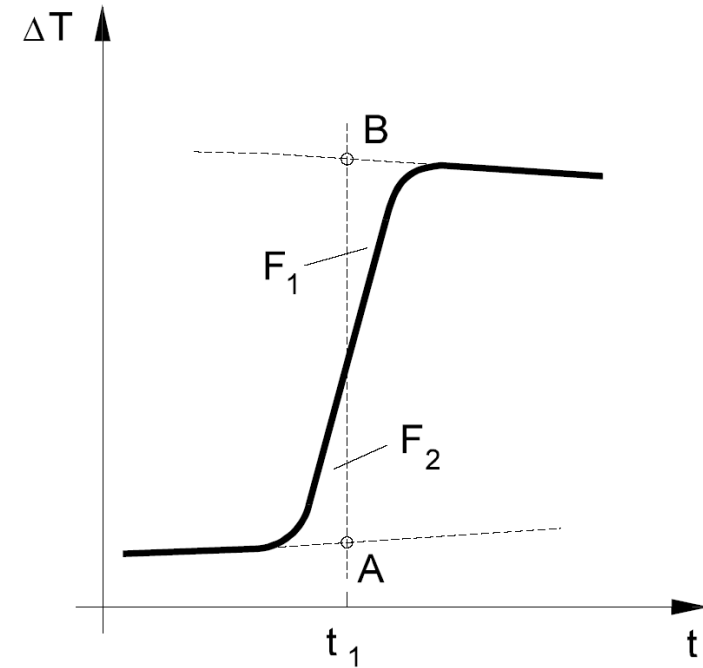
- B 1 Überwurfmutter
- B 2 Verschußkopf
- B 3 Gefäß



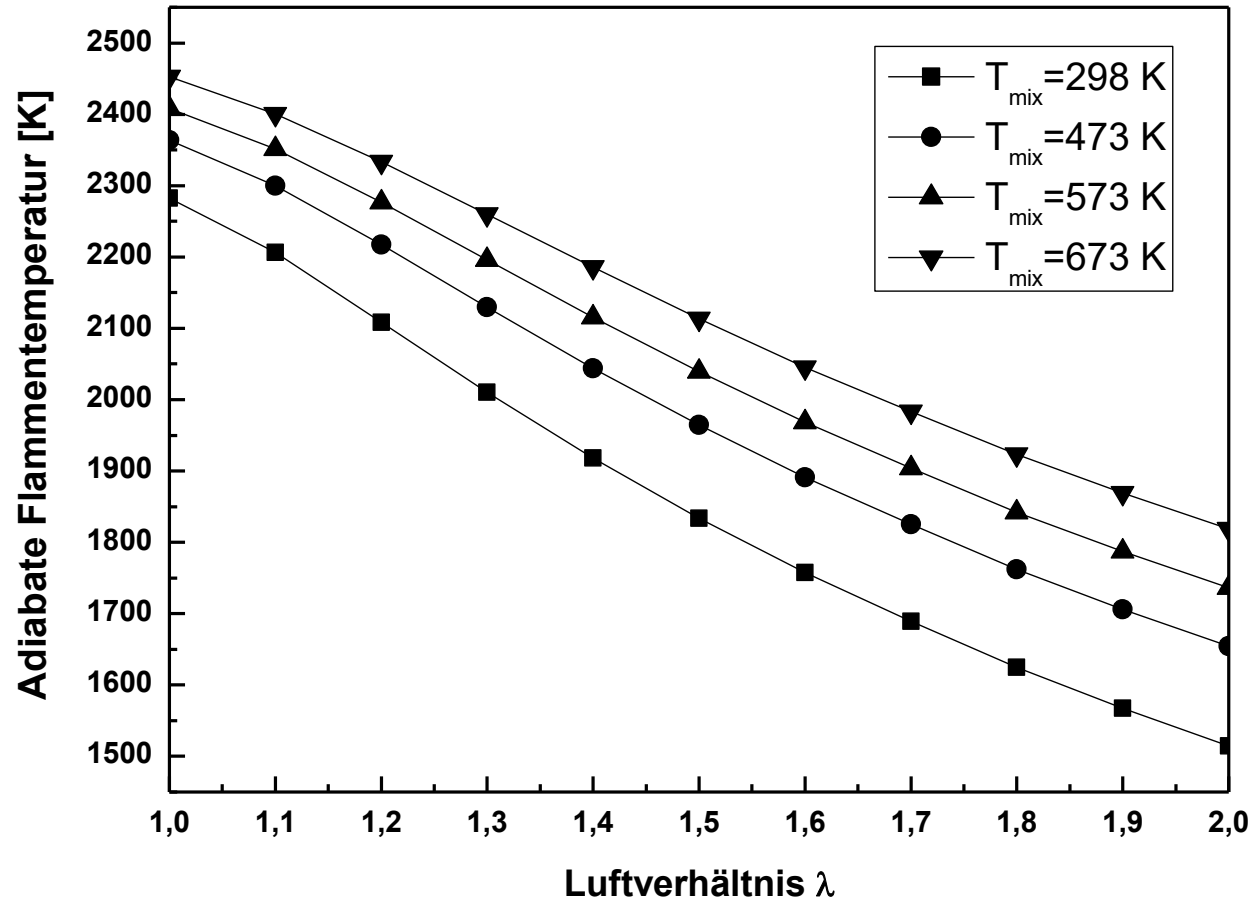
Bestimmung der Verbrennungswärme



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

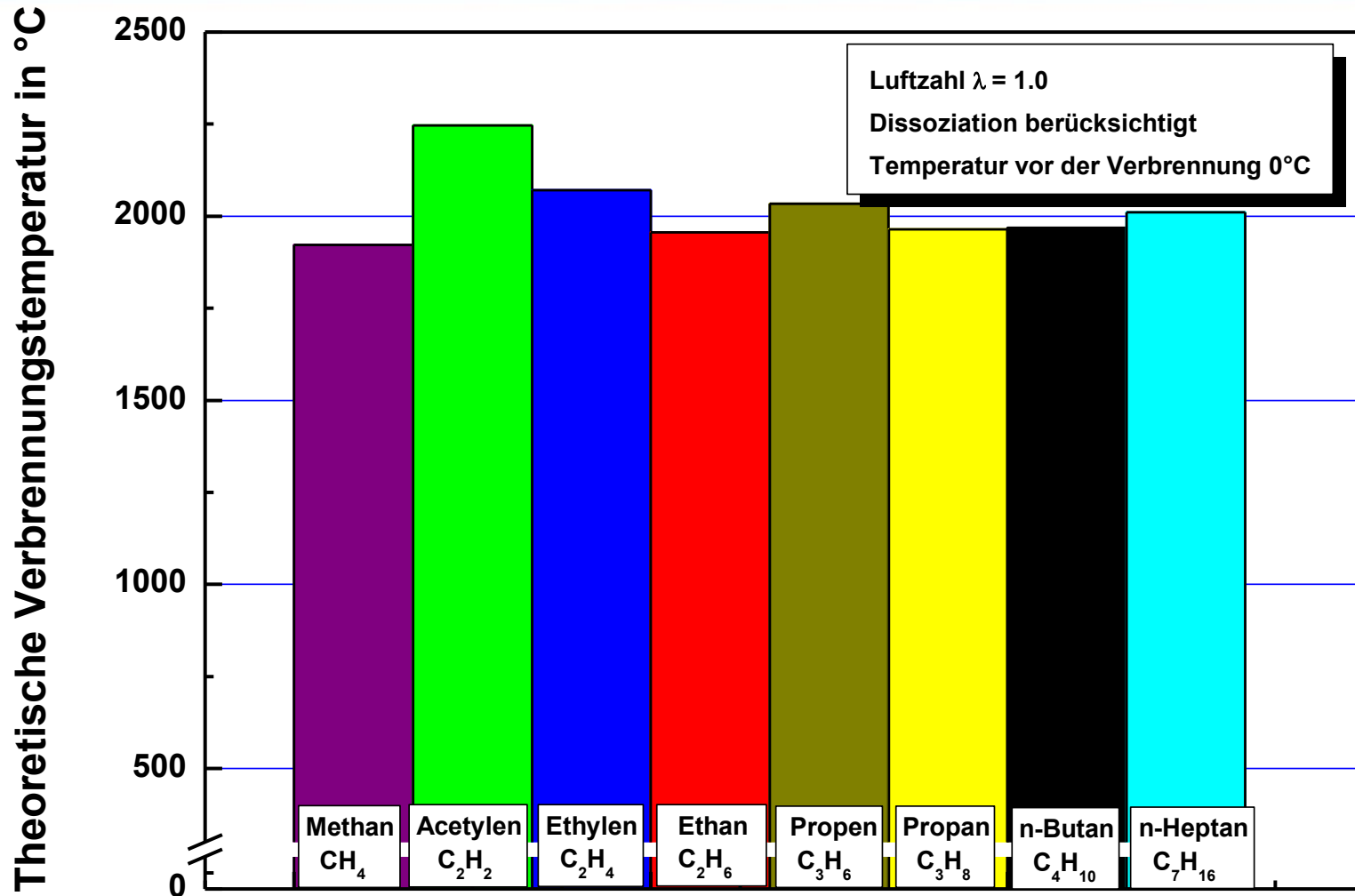


$$q = C_{Kal} \cdot (T_B - T_A) = C_{Kal} \cdot \Delta T$$



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

Verbrennungsrechnung



Adiabate Flammentemperatur verschiedener Kohlenwasserstoffe