

Inhalt: Bericht über den Vergleichsprozess

Technischer Prüfstand

für den Otto-Motor.

Nr. 347

Berechnet für Methanol und Benzol als Kraftstoffe.

Bericht von Herrn Ing. Rainald Halder

I-81

vom 30. November 1937

Gesehen von der Direktion

Zur Kenntnis an:

Empfänger	Ein-gang	Weiter	Unterschrift
28802			

I.G. Farbenindustrie Aktiengesellschaft

Techn. Prüfstand Op. 200

Bericht Nr. 341

= o =

B e r i c h t

über den

Vergleichsprozess für den Otto-Motor.

Berechnet für Methanol und Benzol als Kraftstoffe.

28803

= 0 =

## B e r i c h t

über den

### Vergleichsprozess für den Otto-Motor.

Berechnet für Methanol und Benzol als Kraftstoffe.

Im Folgenden wird der Vergleichsprozess des Otto-Motors (Abb. 1) für Benzol und Methanol berechnet

- A) Nach einem Verfahren von Nußelt (s. Sonderdruck)
- B) nach einem graphischen Verfahren von Pflaum (s. "I. Diagramme für Verbrennungsgase")
- C) nach einem einfachen Verfahren in Anlehnung an die Hütte (s. "Hütte", Bd. 1, 25. Aufl. S. 474).

### Diskussion der einzelnen Verfahren.

Alle Verfahren setzen bei theoretischer Luftmenge vollkommene Verbrennung voraus. Nicht berücksichtigt werden: Die Drosselung während des Ansaugens und Ausschlebens, die im Zylinder verbleibenden Restgase sowie der Wärmeübergang an die Zylinderwand.

A) Das Verfahren von NuJelt berücksichtigt die Veränderlichkeit der spezifischen Wärme der Gase mit der Temperatur und die Veränderung der Gaszusammensetzung durch die Verbrennung. Die Dissoziation wird vernachlässigt. Verwendet wird die spez. Wärme nach Schmidt und Schnell, die gegenüber den Schuleschen Werten etwas niedriger liegen und daher höhere Verbrennungs- und Auspufftemperaturen liefern. Das Verfahren hat den Nachteil, daß der Zeitaufwand für die umfangreiche Rechenarbeit ziemlich erheblich ist.

B) Das graphische Verfahren von Pflaum berücksichtigt ebenfalls die Veränderlichkeit der spez. Wärme der Gase mit der Temperatur, außerdem auch noch die Dissoziation. Der Veränderung der Gaszusammensetzung durch die Verbrennung wird jedoch nur in beschränktem Umfang Rechnung getragen. Da die Zusammensetzung der Verbrennungsgase der einzelnen Kraftstoffe untereinander verschieden ist, müßte streng genommen für jeden Kraftstoff ein eigenes  $I''$ -Diagramm zur Verfügung stehen. Der Einfachheit halber hat Pflaum die Kraftstoffe in zwei Gruppen eingeteilt und nur für diese beiden Gruppen  $I''$ -Diagramme der Verbrennungsgase ausgearbeitet. Der Fehler der hierbei entsteht ist jedoch so klein, daß er vernachlässigt werden kann.

Die beiden Brennstoffgruppen sind :

Gruppe I : Benzol, Benzin, Gasöl, Koksogas,  
Leuchtgas, Luftgas und Steinkohle.

Gruppe II : Gichtgas und Wassergas.

Der Gebrauch dieser  $I^v$ -Diagramme ist ebenso einfach wie das Arbeiten mit den bekannten IS-Tafeln des Wasserdampfes. Im Folgenden wird der Rechnungsgang kurz geschildert.

Der Zustand des Kraftstoff-Luftgemisches zu Beginn der Kompression (Punkt 1, siehe Abb. 1) wird als bekannt vorausgesetzt. Im  $I^v$ -Diagramm für Luft erhält man diesen Punkt als Schnitt der Isobaren  $p_1$  mit der Isothermen  $t_1$  und damit auch den Wärmeinhalt  $I_1$  und das spez. Volumen  $v_1$  (s. Abb. 2). Zieht man durch den Punkt 1 eine Linie konstanter Entropie, so bekommt man den Punkt 2 als Schnitt mit der Isochoren  $v_2 = \epsilon v_1$ . Der Endzustand der Verbrennung muß im  $I^v$ -Diagramm der Verbrennungsgase durch Probieren gefunden werden. Das spez. Volumen  $v_3$  kann aus  $v_2$  berechnet werden ( $v_3 = \frac{v_2}{\beta}$ ,  $\beta$  = Volumenänderung bei der Verbrennung). Auf der Isochoren  $v_3$  ist in Abb. 3 ein Punkt 3 so zu wählen, daß der dazugehörige Wärmeinhalt  $I_3$  und die dazugehörige Temperatur  $t_3$  der Verbrennungsgleichung genügen.

$$\text{Verbr. Gleichung: } I_3 = \frac{I_2}{\beta} + \frac{H_u}{V_g} \quad \text{AR } (t_3 - t_2)$$

dabei ist :  $H_u$  = Heizwert von 1 kg Kraftstoff in kcal/kg.

$V_g$  = Volumen des Gemisches pro kg Kraftstoff  
im obm (760),

$R$  = Gaskonstante mkg/m<sup>3</sup> °C.

Der Punkt 4 liegt als Endpunkt der adiabatischen Expansion auf der Linie konstanter Entropie durch den Punkt 3 und auf der Isochoren  $v_4 = \frac{v_3}{\epsilon}$ .

Auf diese Weise erhält man für jeden der 4 Punkte die entsprechenden Werte von  $I$ ,  $p$ ,  $t$  und  $\varrho$  und kann daraus die geleistete Arbeit, den Wirkungsgrad und den mittl. indizierten Druck errechnen.

Das Verfahren liefert trotz des verhältnismäßig geringen Zeitaufwandes Ergebnisse, die für den praktischen Gebrauch genügend genau sind.

C) Das einfache Verfahren in Anlehnung an die „Hütte“ berücksichtigt die Zusammensetzung der Gase und die Veränderlichkeit der spez. Wärme nur durch Wahl der Exponenten der Adiabaten (Kompr.  $K = 1,4$ ; Expansion  $K = 1,24$ ) und die Wahl der mittl. spez. Wärme in der Verbrennungsgleichung. In der folgenden Rechnung wurden diese Werte nur überschlägig geschätzt. Eine halbwegs genaue Bestimmung derselben verursacht bedeutende Rechen- und Nachschlagearbeit, sodaß, wenn schon höhere Genauigkeit verlangt wird, dem Verfahren von Nußelt oder Pflaum der Vorzug zu geben ist.

Nach diesen 3 Verfahren wurde der in Abb. 2 dargestellte Otto-Prozeß berechnet und dabei von folgenden Annahmen ausgegangen :

Kompressionsverhältnis	$\epsilon$	= 1:8
Druck bei Beginn der Kompr.		= 0,95 ata
Temperatur bei Beginn der Kompr. f. Meth.:	$t_1$	= 46°C
"                  "                  "                  "                  "                  "                  "	f. Benzin:	$t_1$ = 77°C.

In nachstehender Tabelle sind die Ergebnisse der 3 Verfahren zusammengestellt. Im allgemeinen ist gute Über-

Zusammenstellung von Rechenergebnissen.

	Methanol			Benzol		
	Nußelt	Pflaum	Einf.Meth.	Nußelt	Pflaum	Einf.Meth.
P <sub>1</sub> ata	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
T <sub>1</sub> abs	319	319	319	350	350	350
P <sub>2</sub> ata	17,2	17,0	17,4	16,9	17,0	17,4
T <sub>2</sub> abs	720	708	733	775	783	805
P <sub>3</sub> ata	73,8	73	72,7	74,8	69	71,2
T <sub>3</sub> abs	2915	2773	2893	3400	3023	3135
P <sub>4</sub> ata	5,58	6,0	5,52	5,7	5,8	5,38
T <sub>4</sub> abs	1760	1793	1750	2050	2043	1900
th	0,432	0,44	0,432	0,418	0,40	0,413
pm <sub>1</sub> ata	13,4	14,0	13,5	13,4	12,8	13,2

einstimmig zu erkennen, lediglich zwischen den Verbrennungstemperaturen bestehen besonders für Benzol größere Unterschiede, die darauf zurückzuführen sind, daß Nußelt die spez. Wärme nach Schmidt und Schnell verwendet, während Pflaum die spez. Wärme nach Schüle zu Grunde legt und dabei außerdem noch die Dissoziation berücksichtigt, die bei Nußelt vernachlässigt wird.

*Halder*

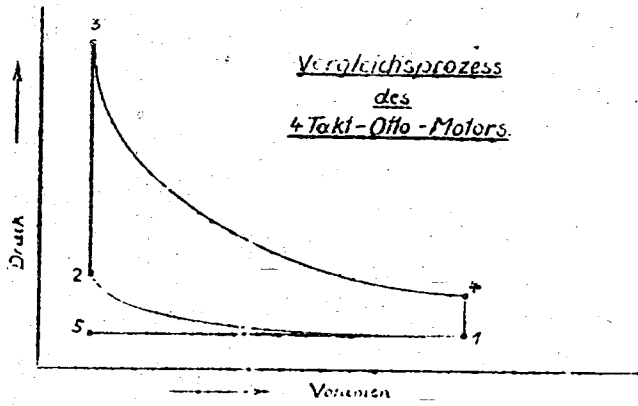


Abb. 1

Darstellung der Kompression im  $J\eta$ -Diagramm für Luft.

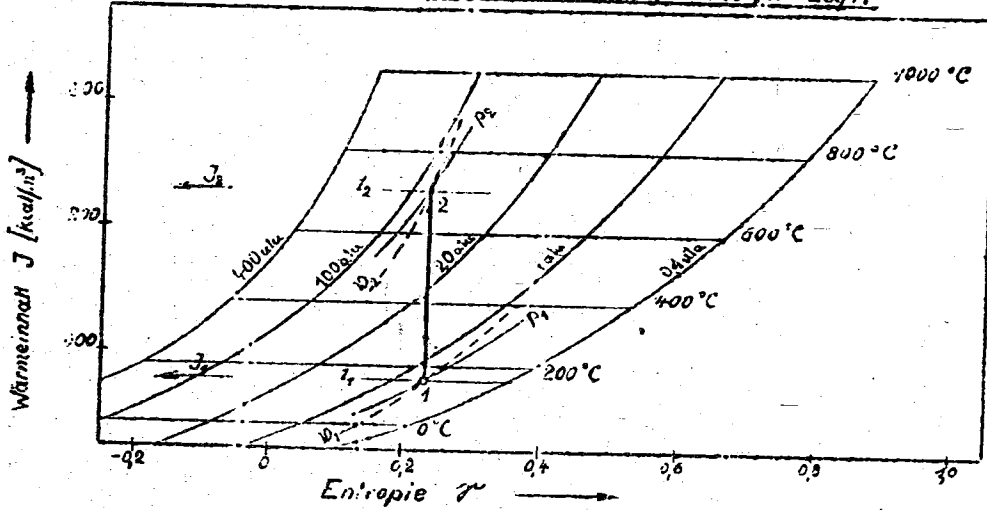


Abb. 2

Darstellung der Expansion im  $J\eta$ -Diagramm für Verbrennungsgase.

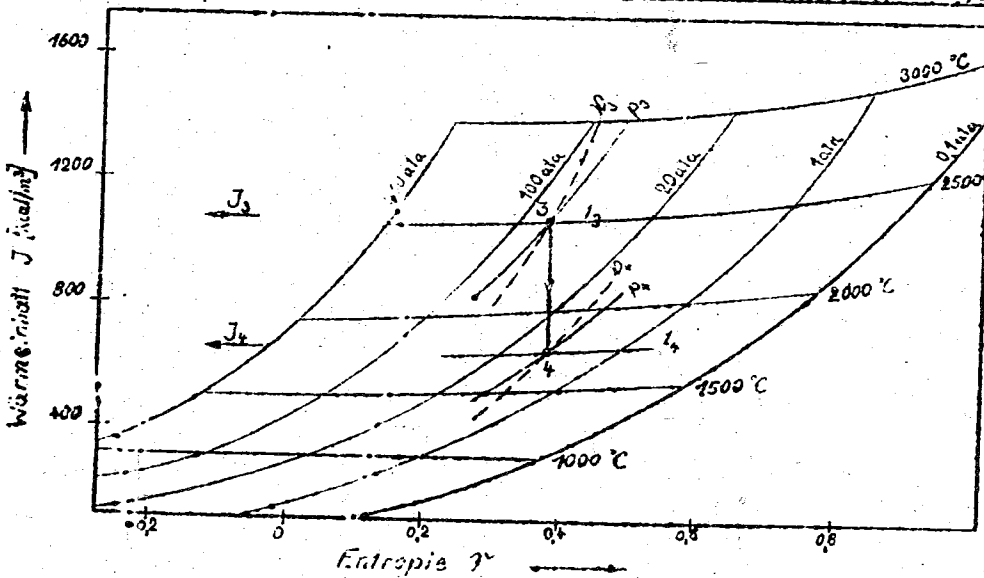


Abb. 3



# Anhang.

## Durchführung der Berechnung des Vergleichs- prozesses.

### A. Verfahren nach Nusselt.

Der Berechnung wird 1 kg Kraftstoff zugrunde gelegt, der in dampf-  
förmigen Zustand der Maschine zugeführt wird.

die Luftüberschusszahl sei  $\lambda = 10$

das Kompressionsverhältnis  $\epsilon = 1:8$

Druck bei Beginn der Komp.  $p_1 = 700 \text{ mm Q. S.}$

Methanol.

Benzol.

Heizwert.

$$H_u = 4650 \text{ Kcal/Kg}$$

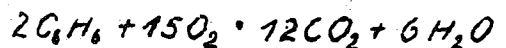
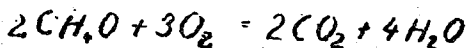
$$H_u = 9590 \text{ Kcal/Kg}$$

Temperatur zu Beginn der Kompression.

$$t_1 = 46^\circ \text{C}, \quad T_1 = 319^\circ \text{ abs.}$$

$$t_1 = 77^\circ \text{C}, \quad T_1 = 350^\circ \text{ abs.}$$

Verbrennungsgleichung.



Molekulargewichte.

$$\text{O}_2 = 32, \quad \text{CH}_3\text{O} = 32$$

$$\text{O}_2 = 32, \quad \text{C}_6\text{H}_6 = 78$$

Methanol.

Benzol.

Notwendiger Sauerstoff.

$O_{2\ min} = \frac{3}{2} = 1,5 \text{ Mol/Mol Methanol}$

$O_{2\ min} = 7,5 = \frac{15}{2} \text{ Mol/Mol Be.}$

$O_{2\ min} = \frac{1,5 \cdot 24,42}{32} \text{ m}^3/\text{kg Meth.} \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

$O_{2\ min} = \frac{7,5 \cdot 24,42}{78} \text{ m}^3/\text{kg Be} \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

Molarvolumen bei 15°C u. 1013 = 24,42 m<sup>3</sup>/Mol.

Notwendige Luftmenge.

$L_{min} = \frac{O_{2\ min}}{0,21} = 5,46 \text{ m}^3/\text{kg Meth.} \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

$L_{min} = \frac{O_{2\ min}}{0,21} = 19,2 \text{ m}^3/\text{kg Be.} \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

$L_{min} = \frac{5,46 \cdot 735(273+15)}{100(273+15)} \text{ m}^3/\text{kg}$

$L_{min} = \frac{19,2 \cdot 735(273+15)}{100(273+15)} \text{ m}^3/\text{kg}$

$L_{min} = 6,34 \text{ m}^3/\text{kg Meth.} \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

$L_{min} = 14,24 \text{ m}^3/\text{kg Be.} \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

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

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

$\alpha = 1 \quad L = 6,34 \text{ m}^3/\text{kg Meth.} \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

$\alpha = 1 \quad L = 14,24 \text{ m}^3/\text{kg Be} \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

Volumen von 1kg Kraftstoff.

$B = \frac{\text{Molarvolumen} \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]}{\text{Molekulargewicht}} \text{ m}^3/\text{kg} \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

$B = \sim \frac{24,42 \cdot 735(273+15)}{32 \cdot 100(273+15)} = 0,886 \text{ m}^3 \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

$B = \sim \frac{24,42 \cdot 735(273+15)}{78 \cdot 100(273+15)} = 0,4 \text{ m}^3 \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

Gemischvolumen pro kg Kraftstoff.

$V_g = B + L = 7,226 \text{ m}^3/\text{kg Meth.} \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

$V_g = B + L = 14,64 \text{ m}^3/\text{kg Be} \left[ \frac{15^\circ}{1013} \right]$

Zusammensetzung des Gemisches vor der Verbrennung.  
in Molern.

$n_2$  = Zahl der vorhandenen Mole des Gases i vor der Verbrennung.

$n_1$  für 1 kg Kraftstoff =  $\frac{1}{\text{Molekulargewicht des Kraftstoff}}$

$n_{O_2}$  =  $\frac{(\text{Zahl der vorhandenen } O_2 \text{ Mole pro Mol Kraftstoff}) \cdot (\text{Molekulargewicht des } O_2)}{(\text{Molekulargewicht des Kraftstoff}) \cdot (\text{Gemischanteil des } O_2 \text{ in Luft}) \cdot (\text{Mol. Gew. des Luft})}$

Methanol.

$$m'_{\text{Meth.}} = \frac{1}{32} = 0,0312$$

$$m'_{\text{Luft}} = \frac{15 \cdot 32}{32 \cdot 0,233 \cdot 23,95} = 0,2228$$

$$\Sigma m'_i = 0,2540$$

Benzol.

$$m'_{\text{Be}} = \frac{1}{78} = 0,0128$$

$$m'_{\text{Luft}} = \frac{75 \cdot 78}{32 \cdot 0,233 \cdot 23,95} = 0,4568$$

$$\Sigma m'_i = 0,4696$$

Zusammensetzung der Verbrennungsgase in Molen.

[siehe Verbrennungsgleichung]

$$m''_{\text{CO}_2} = m'_{\text{Meth.}} = 0,0312$$

$$m''_{\text{H}_2\text{O}} = 2 m'_{\text{Meth.}} = 0,0624$$

$$m''_{\text{N}_2} = 0,79 m'_{\text{Luft}} = 0,1760$$

$$\Sigma m''_i = 0,2696$$

$$m''_{\text{CO}_2} = 6 m'_{\text{Be}} = 0,0767$$

$$m''_{\text{H}_2\text{O}} = 3 m'_{\text{Be}} = 0,0383$$

$$m''_{\text{N}_2} = 0,79 m'_{\text{Luft}} = 0,3610$$

$$\Sigma m''_i = 0,4760$$

I. Kompression.

Gleichung der adiabatischen Kompression:

$$\Sigma m'_i f_i(T_2) = \Sigma m'_i f_i(T_1) + AR(\ln \epsilon) \Sigma m'_i \quad (1)$$

Diese Gleichung muß durch Probieren gelöst werden.

Die  $m'_i$ -Werte sind bekannt, die  $f(T)$ -Werte können für Luft aus der Tabelle entnommen werden, für Kraftstoff werden die  $f(T)$ -Werte geschätzt. (Fehler gering).

$$\Sigma m'_i f_i(T_1) \text{ für } T_1 = 319^\circ$$

$$\Sigma m'_i f_i(T_2) \text{ für } T_2 = 350^\circ$$

Methanol.

$$m'_{\text{Meth}} \cdot f_{\text{Meth}} = 0,0312 \cdot 26,0 = 0,810$$

$$m'_{\text{Luft}} \cdot f_{\text{Luft}} = 0,2228 \cdot 33,44 = 7,440$$

$$\Sigma m'_i f_i(T_2) = 8,250$$

$$\begin{aligned} AR \cdot (C_n E) \Sigma m'_i &= 1,986 \cdot 2,079 \cdot 0,254 \\ &= 1,05 \text{ Kcal/Kg} \end{aligned}$$

somit:

$$\begin{aligned} \Sigma m'_i f_i(T_2) &= 8,25 + 1,05 \\ &= 9,3 \text{ Kcal/Kg} \end{aligned}$$

1. Annahme:  $T_2 = 700^\circ$ 

$$\Sigma m'_i f_i(T_2) =$$

$$\text{Meth.} : 0,0312 \cdot 29 = 0,904$$

$$\text{Luft} : 0,2228 \cdot 37,50 = 8,350$$

$$\Sigma m'_i f_i(T_2) = 9,254$$

gegenüber 9,3 Kcal/Kg zu klein,

daher:

2. Annahme:  $T_2 = 800^\circ$ 

$$\text{Meth.} : 0,0312 \cdot 30 = 0,935$$

$$\text{Luft} : 0,2228 \cdot 38,23 = 8,520$$

$$\Sigma m'_i f_i(T_2) = 9,455 \text{ Kcal/Kg}$$

gegenüber 9,3 Kcal/Kg zu groß!

daher:

3. Annahme:  $T_2 = 730^\circ$ Benzol.

$$m'_{\text{Be}} \cdot f_{\text{Be}} = 0,0128 \cdot 138,5 = 1,77$$

$$m'_{\text{Luft}} \cdot f_{\text{Luft}} = 0,4568 \cdot 33,874 = 15,50$$

$$\Sigma m'_i f_i(T_2) = 17,27$$

$$\begin{aligned} AR \cdot (C_n E) \Sigma m'_i &= 1,986 \cdot 2,079 \cdot 0,4696 \\ &= 1,94 \text{ Kcal/Kg} \end{aligned}$$

somit:

$$\begin{aligned} \Sigma m'_i f_i(T_2) &= 17,27 + 1,94 \\ &= 19,21 \text{ Kcal/Kg} \end{aligned}$$

1. Annahme:  $T_2 = 750^\circ$ 

$$\Sigma m'_i f_i(T_2) =$$

$$\text{Be} : 0,0128 \cdot 114,0 = 1,49$$

$$\text{Luft} : 0,4568 \cdot 37,865 = 17,25$$

$$\Sigma m'_i f_i(T_2) = 19,14$$

gegenüber 19,21 Kcal/Kg zu klein,

daher:

2. Annahme:  $T_2 = 800^\circ$ 

$$\text{Be} : 0,0128 \cdot 150 = 1,92$$

$$\text{Luft} : 0,4568 \cdot 38,234 = 17,40$$

$$\Sigma m'_i f_i(T_2) = 19,32 \text{ Kcal/Kg}$$

gegenüber 19,14 Kcal/Kg zu groß!

Methanol.

Meth.:  $0,0312 \cdot 29,3 = 0,913$

Luft:  $0,2228 \cdot 37,72 = 8,410$

$\Sigma m_i s_i (T_2) = 9,323$

Durch Interpolieren:  $T_2 = 720^\circ$

Benzol.

Durch Interpolieren:  $T_2 = 75^\circ$

Darnach errechnet sich der Druck  $p_2 = \frac{R \cdot T_2 \cdot \Sigma m_i}{V_0}$  ;

dabei ist  $V_0 = \frac{V_1}{t}$ .

$p_2 = \frac{348 \cdot 720 \cdot 0,254 \cdot 8}{7,226} = 17,2 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^2$

$p_2 = 17,2 \text{ ata}$

$p_2 = \frac{878 \cdot 775 \cdot 0,469 \cdot 8}{74,69} = 16,9 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^2$

$p_2 = 16,9 \text{ ata}$

II. Verbrennung.

Der 1. Hauptsatz über die Verbrennung lautet:

$T_3 \Sigma m_i^* C_{vi} /_0^{T_3} = T_2 \Sigma m_i^* C_{vi} /_0^{T_2} + E$  (2)

dabei ist  $C_{vi} /_0^T$  die mittlere spez. Wärme pro Mol eines Gases i zwischen den Temperaturen  $0^\circ$  u.  $T$ .

Die chemische Energie E errechnet nach dem 1. Hauptsatz über das Kalorimeter:

$E = H_u + T_1 [\Sigma m_i^* C_{vi} /_0^{T_1} - \Sigma m_i^* C_{vi} /_0^{T_1} + AR(\Sigma m_i^* - \Sigma m_i)]$  (3)

Berechnung von E.

$\Sigma m_i^* C_{vi} /_0^{T_1}$   $T_1 = 319^\circ$

$\Sigma m_i^* C_{vi} /_0^{T_1}$   $T_1 = 350^\circ$

Methanol

CO<sub>2</sub>: 0,0312 · 5,6 = 0,175

H<sub>2</sub>O: 0,0624 · 5,97 = 0,373

N<sub>2</sub>: 0,1760 · 4,94 = 0,87

Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>1</sub> = 1,418

Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>1</sub> T<sub>1</sub> = 319°

Meth.: 0,0312 · 3,84 = 0,12

Luft: 0,2228 · 4,95 = 1,10

Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>1</sub> = 1,22

AR(Σ m<sub>i</sub> - Σ m<sub>i</sub>) = 1,986(0,2696 - 0,254)  
= 0,031

somit

E = 4650 + 319 [1,418 - 1,22 + 0,031]

E = 4650 + 73 = 4723 Kcal/Kg

Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>2</sub> für T<sub>2</sub> = 720°

Meth.: 0,0312 · 3,84 = 0,120

Luft: 0,2228 · 5,08 = 1,130

Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>2</sub> = 1,253 Kcal/Kg

Diese Werte von E und Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>2</sub> ergeben in Gl (2) eingesetzt

T<sub>3</sub> Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>3</sub> = 720 · 1,253 + 4723

= 5625 Kcal/Kg

Benzol

CO<sub>2</sub>: 0,076 · 5,77 = 0,442

H<sub>2</sub>O: 0,0383 · 5,98 = 0,229

N<sub>2</sub>: 0,361 · 4,94 = 1,788

Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>1</sub> = 2,459

Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>1</sub> T<sub>1</sub> = 350°

Be: 0,0128 · 19,8 = 0,253

Luft: 0,4568 · 4,943 = 2,255

Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>1</sub> = 2,508

AR(Σ m<sub>i</sub> - Σ m<sub>i</sub>) = 1,986(0,4760 - 0,4696)  
= 0,0127

somit

E = 9590 + 350(2,459 - 2,508 + 0,0127)

E = 9590 - 13 = 9577 Kcal/Kg

Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>2</sub> für T<sub>2</sub> = 775°

Be.: 0,0128 · 19,8 = 0,253

Luft: 0,4568 · 5,107 = 2,330

Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>2</sub> = 2,583 Kcal/Kg

T<sub>3</sub> Σ m<sub>i</sub> C<sub>vi</sub> / T<sub>3</sub> = 775 · 2,583 + 9577

= 11576 Kcal/Kg

Methanol

$T_3$  muß wieder durch Newtonsche Methode gefunden

1. Annahme:  $T_3 = 3000^\circ$

$CO_2: 0,0312 \cdot 16,35 = 0,510$

$H_2O: 0,0624 \cdot 8,09 = 0,507$

$N_2: 0,1760 \cdot 6,94 = 1,221$

$\Sigma m_i C_{v,i} / T_3 = 2,238$

$T_3 \cdot \Sigma m_i C_{v,i} / T_3 = 3000 \cdot 2,238$

$= 6714 \text{ cal/g}$

zu groß gegenüber  $U = 4000 \text{ cal/g}$

daher:

2. Annahme:  $T_3 = 2500^\circ$

$CO_2: 0,0312 \cdot 16,35 = 0,510$

$H_2O: 0,0624 \cdot 8,09 = 0,507$

$N_2: 0,1760 \cdot 6,94 = 1,221$

$\Sigma m_i C_{v,i} / T_3 = 2,238$

$T_3 \cdot \Sigma m_i C_{v,i} / T_3 = 2500 \cdot 2,238$

$= 5595 \text{ cal/g}$

durch Interpolation ergibt sich

$p_3 = \frac{RT_3 \Sigma m_i C_{v,i}}{V_0} = \frac{8,314 \cdot 2500 \cdot 2,238}{0,223} = 203,8 \text{ bar}$

$p_3 = 73,8 \text{ ata}$

Benzol

1. Annahme:  $T_3 = 3000^\circ$

$CO_2: 0,0207 \cdot 16,35 = 0,338$

$H_2O: 0,0414 \cdot 8,09 = 0,335$

$N_2: 0,1257 \cdot 6,94 = 0,870$

$\Sigma m_i C_{v,i} / T_3 = 1,543$

$T_3 \cdot \Sigma m_i C_{v,i} / T_3 = 3000 \cdot 1,543$

$= 4629 \text{ cal/g}$

zu groß gegenüber  $U = 4000 \text{ cal/g}$

daher:

2. Annahme:  $T_3 = 2500^\circ$

$CO_2: 0,0207 \cdot 16,35 = 0,338$

$H_2O: 0,0414 \cdot 8,09 = 0,335$

$N_2: 0,1257 \cdot 6,94 = 0,870$

$\Sigma m_i C_{v,i} / T_3 = 1,543$

$T_3 \cdot \Sigma m_i C_{v,i} / T_3 = 2500 \cdot 1,543$

$= 3858 \text{ cal/g}$

durch Interpolation ergibt sich

$p_3 = \frac{RT_3 \Sigma m_i C_{v,i}}{V_0} = \frac{8,314 \cdot 2500 \cdot 1,543}{0,142} = 146,8 \text{ bar}$

$p_3 = 74,8 \text{ ata}$

Expansions

Gleichung der adiabatischen Expansion:

$$\sum m_i'' f_i(T_1) = \sum m_i' f_i(T_2) + AR \cdot (T_1) \sum m_i' \quad (4)$$

Diese Gleichung mu\u00df durch Probieren gel\u00f6st werden.

$\sum m_i'' f_i(T_3) =$  für  $T_3 = 2975^\circ$

CO<sub>2</sub>: 0,0312 · 57,7 = 1,80

H<sub>2</sub>O: 0,0624 · 58 = 3,62

N<sub>2</sub>: 0,1760 · 16,76 = 2,93

---

$\sum m_i'' f_i(T_3) = 7,355 \text{ kcal/kg}$

AR (en E)  $\sum m_i' = 1,986 \cdot 2,079 \cdot 0,2696 = 1,177 \text{ kcal/kg}$

$\sum m_i' f_i(T_2) =$  für  $T_2 = 3400^\circ$

CO<sub>2</sub>: 0,0767 · 59,616 = 4,575

H<sub>2</sub>O: 0,0383 · 59,723 = 2,285

N<sub>2</sub>: 0,367 · 17,795 = 6,503

---

$\sum m_i' f_i(T_2) = 23,89 \text{ kcal/kg}$

AR (en E)  $\sum m_i' = 1,986 \cdot 2,079 \cdot 0,4760 = 1,96 \text{ kcal/kg}$

Diese Werte in Gleichung (4) eingesetzt, ergeben:

$\sum m_i'' f_i(T_4) = 7,355 - 1,177 = 6,178$

Annahme:  $T_4 = 1760^\circ$

CO<sub>2</sub>: 0,0312 · 51,4 = 1,60

H<sub>2</sub>O: 0,0624 · 52,8 = 3,29

N<sub>2</sub>: 0,176 · 42,8 = 7,54

---

$\sum m_i'' f_i(T_4) = 12,43$

somit:  $T_4 = 1760^\circ$

$\sum m_i' f_i(T_4) = 23,89 - 1,96 = 21,93$

Annahme:  $T_4 = 2050^\circ$

CO<sub>2</sub>: 0,0767 · 53,325 = 4,09

H<sub>2</sub>O: 0,0383 · 54,343 = 2,08

N<sub>2</sub>: 0,367 · 43,823 = 15,87

---

$\sum m_i' f_i(T_4) = 22,04$

somit:  $T_4 = \sim 2050^\circ$



Methanol.

$$P_f = \frac{R \cdot T_0 \cdot \sum m_i}{V_g} = \frac{848 \cdot 7760 \cdot 0,2696}{7226}$$

$P_f = 5,58 \text{ ata}$

Benzol.

$$P_f = \frac{R \cdot T_0 \cdot \sum m_i}{V_g} = \frac{848 \cdot 2050 \cdot 0,476}{74,64}$$

$P_f = 5,7 \text{ ata}$

Geleistete Arbeit  $AL_0$

$$AL_0 = U_3 - U_4 - U_2 + U_1 \quad (5)$$

$$U_3 = T_3 \sum m_i C_{vi} / 0 = 5625 \text{ mwp/kg}$$

$$U_4 = T_4 \sum m_i C_{vi} / 0 = 3110 \text{ "}$$

$$U_2 = T_2 \sum m_i C_{vi} / 0 = 902 \text{ "}$$

$$U_1 = T_1 \sum m_i C_{vi} / 0 = 389 \text{ "}$$

$$U_3 = 11576 \text{ kcal/kg}$$

$$U_4 = 6430 \text{ "}$$

$$U_2 = 2005 \text{ "}$$

$$U_1 = 878 \text{ "}$$

$$AL_0 = 5625 - 3110 - 902 + 389$$

$AL_0 = 2002 \text{ kcal/kg}$

$$AL_0 = 11576 - 6430 - 2005 + 878$$

$AL_0 = 4019 \text{ kcal/kg}$

Thermischer Wirkungsgrad.

$$\eta_{th} = \frac{AL_0}{H_u} \quad (6)$$

$$\eta_{th} = \frac{2002}{4650} = \underline{0,432}$$

$$\eta_{th} = \frac{4019}{9590} = \underline{0,418}$$

Millerer indizierter Druck

$$P_{io} = \frac{L_0}{(V_g - V_0) \cdot 10^4} \quad (7)$$

$$P_{io} = \frac{2002 \cdot 427}{(7,226 - 0,907) \cdot 10^4} = \underline{13,4 \text{ ata}}$$

$$P_{io} = \frac{4019 \cdot 427}{(74,64 - 4,83) \cdot 10^4} = \underline{13,4 \text{ ata}}$$

## B. Grafisches Verfahren nach Pflaum.

Der Berechnung wird 1 cbm [%] Verbrennungsgas zugrunde gelegt.

Die Luftüberschusszahl sei  $\lambda = 1,0$

Das Kompressionsverhältnis  $\epsilon = 1:8$

Druck bei Beginn d. Komp.  $p_1 = 0,95 \text{ ata}$

Methanol.

Benzol.

Heizwert

$H_u = 4650 \text{ kcal/Kg}$

$H_u = 9590 \text{ kcal/Kg}$

Temperatur zu Beginn der Kompression.

$t_1 = 46^\circ \text{C}$

$t_1 = 77^\circ \text{C}$

Verbrennungsgleichung



Volumenveränderung bei der Verbrennung.

$$\sigma = \frac{\text{Vol. nach der Verbrennung}}{\text{Vol. vor der Verbrennung}} = \frac{\text{Vol. (CO}_2\text{)} + \text{Vol. (H}_2\text{O)} + \text{Vol. (N}_2\text{)}}{\text{Vol. (Kraftstoff)} + \text{Vol. (Luft)}}$$

$$\sigma = \frac{2 + 4 + \frac{3}{0,21} - 3}{2 + \frac{3}{0,21}} = 1,06$$

$$\sigma = \frac{12 + 6 + \frac{15}{0,21} - 15}{2 + \frac{15}{0,21}} = 1,073$$

Molekulargewichte.

$\text{O}_2 = 32; \quad \text{CH}_4\text{O} = 32$

$\text{O}_2 = 32; \quad \text{C}_6\text{H}_6 = 78.$

Methanol.Benzol.Notwendiger Sauerstoff.

$$O_{2 \min} = \frac{3}{2} = 1,5 \text{ Mol/Mol Meth.}$$

$$O_{2 \min} = \frac{1,5 \cdot 22,4}{32} \text{ m}^3/\text{kg Meth. [180]}$$

$$O_{2 \min} = \frac{15}{2} = 7,5 \text{ Mol/Mol Be}$$

$$O_{2 \min} = \frac{7,5 \cdot 22,4}{78} \text{ m}^3/\text{kg Be [180]}$$

Molarvolumen bei 0°C u. 760 mm Q. S. = 22,4 m<sup>3</sup>/Mol

Notwendige Luftmenge.

$$L_{\min} = \frac{O_{2 \min}}{0,21} = 5,0 \text{ m}^3/\text{kg Meth. [180]} \quad | \quad L_{\min} = \frac{O_{2 \min}}{0,21} = 10,27 \text{ m}^3/\text{kg Be [180]}$$

Volumen von 1 kg Kraftstoffdampf.

$$B = \sim \frac{\text{Molarvolumen [180]}}{\text{Molekulargewicht.}}$$

$$B = \sim \frac{22,4}{32} = 0,7 \text{ m}^3/\text{kg [180]}$$

$$B = \sim \frac{22,4}{78} = 0,29 \text{ m}^3/\text{kg [180]}$$

Gemischvolumen pro kg Kraftstoff.

$$V_g = \lambda L_{\min} + B$$

$$V_g = 1 \cdot 5,0 + 0,7 = 5,7 \text{ m}^3/\text{kg [180]}$$

$$V_g = 1 \cdot 10,27 + 0,29 = 10,56 \text{ m}^3/\text{kg [180]}$$

Wärmeinhalt zu Beginn der Komp.

$$t_1 = 46^\circ\text{C}, \quad p_1 = 0,95 \text{ ata}$$

$$t_1 = 77^\circ\text{C}, \quad p_1 = 0,95 \text{ ata}$$

mit diesen Werten erhält man aus Tafel 10

$$J_1 = 14 \text{ Kcal/m}^3$$

$$v_1 = 1,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$J_1 = 24 \text{ Kcal/m}^3$$

$$v_1 = 1,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Wärmeinhalt am Ende der Kompression.

$$v_2 = \frac{v_1}{\epsilon} = \frac{1,25}{8} = 0,156 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\epsilon} = \frac{1,4}{8} = 0,175 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Methanol

Benzol

Mit diesem Wert erhält man auf der Linie konstanter Entropie

$p_2 = 17 \text{ ata}; \quad t_2 = 425^\circ\text{C}$

$p_2 = 17 \text{ ata}; \quad t_2 = 510^\circ\text{C}$

$J_2 = 138 \text{ kcal/m}^3$

$J_2 = 162 \text{ kcal/m}^3$

Wärmeinhalt nach der Verbrennung

Verbrennungsgleichung:  $J_3 = \frac{J_2}{\rho} + \frac{H_v}{V_0 \rho} + A \cdot R (t_3 - t_2)$  (8)

Die entsprechenden Werte in Gleichung (8) eingesetzt ergeben:

$J_3 = \frac{138}{106} + \frac{4650}{57 \cdot 106} + \frac{37,84}{427} (t_3 - 435)$

$J_3 = \frac{162}{1013} + \frac{9510}{1050 \cdot 1013} + \frac{37,84}{427} (t_3 - 510)$

$J_3 = 861,5 + 0,0385 t_3$

$J_3 = 1012 + 0,0885 t_3$  (8a)

$\rho_3 = \frac{p_3}{p} = \frac{0,356}{1,06} = 0,336 \text{ m}^3/\text{m}^3$

$\rho_3 = \frac{p_3}{p} = \frac{0,115}{1,13} = 0,102 \text{ m}^3/\text{m}^3$

Die Gleichung (8a) muß durch Probieren mit Hilfe der Taf. 1 gelöst werden.

1. Annahme:  $t_3 = 2500^\circ\text{C}$

1. Annahme:  $t_3 = 2700^\circ\text{C}$

damit errechnet sich aus Gleichung (8a) ein  $J_3$  von

$J_3 = 1085 \text{ kcal/m}^3$

$J_3 = 1254 \text{ kcal/m}^3$

aus Tafel 1 kann ein  $J_3$  entnommen werden von

$J_3 = 1085 \text{ kcal/m}^3$

$J_3 = 1220 \text{ kcal/m}^3$

Unterschied = 0

Unterschied:  $34 \text{ kcal/m}^3$

daher:

2. Annahme:  $t_3 = 2750^\circ\text{C}$

berechnet:  $J_3 = 1255 \text{ kcal/m}^3$

aus Tafel:  $J_3 = 1255 \text{ kcal/m}^3$

somit:  $t_3 = 2500^\circ\text{C}; \quad p_3 = 73 \text{ ata}$

somit:  $t_3 = 2750^\circ\text{C}; \quad p_3 = 69 \text{ ata}$

$J_3 = 1085 \text{ kcal/m}^3$

$J_3 = 1255 \text{ kcal/m}^3$

Methanol.

Benzol.

Wärmeinhalt am Ende der Expansion.

$$D_4 = \epsilon D_3 = 1,777 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$D_4 = \epsilon D_3 = 1,38 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

damit erhält man aus Tafel 4:

$$p_4 = 6,0 \text{ ata}; t_4 = 452,0^\circ \text{C}$$

$$p_4 = 5,8 \text{ ata}; t_4 = 417,0^\circ \text{C}$$

$$J_4 = 575 \text{ kcal/m}^3$$

$$J_4 = 695 \text{ kcal/m}^3$$

Geleistete Arbeit.

(9)

$$AL_0 = (J_3 - J_4) - \frac{1}{\beta} (J_2 - J_1) + A D_4 (p_4 - p_1) \cdot \frac{10^4 - p_1}{\epsilon} \cdot 10^4 \text{ kcal/m}^3$$

$$AL_0 = 510 - \frac{124}{106} - \frac{1177 \cdot 195 \cdot 10^4}{427}$$

$$AL_0 = 550 - \frac{138}{101} - \frac{1177 \cdot 155 \cdot 10^4}{427}$$

$$AL_0 = 339 \text{ kcal/m}^3$$

$$AL_0 = 367 \text{ kcal/m}^3$$

Thermischer Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = \frac{AL_0 \cdot V_4 \cdot \beta}{H_u}$$

$$\eta_{th} = \frac{339 \cdot 57 \cdot 106}{4650} = 0,44$$

$$\eta_{th} = \frac{367 \cdot 1056 \cdot 1013}{9550} = 0,40$$

Mittlerer theoretischer Kolbendruck:

$$p_{mi} = \frac{427 \cdot AL_0}{10^4 (D_4 - D_3)}$$

$$p_{mi} = \frac{427 \cdot 339}{10^4 (1,777 - 0,147)} = 14,0 \text{ ata}$$

$$p_{mi} = \frac{427 \cdot 367}{10^4 (1,38 - 0,113)} = 12,8 \text{ ata}$$

C. Einfaches Verfahren in Anlehnung an die Hütte.

Der Berechnung wird 1kg Kraftstoff zugrunde gelegt.

Die Luftüberschusszahl sei  $\lambda = 1,0$

Das Kompressionsverhältnis  $\epsilon = 1:8$

Druck bei Beginn der Kompression  $p_1 = 0,95 \text{ ata}$ .

Methanol.

Benzol.

Temperatur zu Beginn der Kompression.

$$T_1 = 46 + 273 = 319^\circ$$

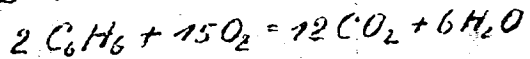
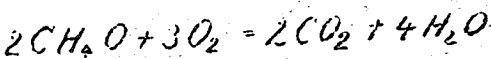
$$T_1 = 77 + 273 = 350^\circ$$

Heizwert.

$$H_{u1} = 4650 \text{ kcal/kg}$$

$$H_{u2} = 9590 \text{ kcal/kg}$$

Verbrennungsgleichung.



Volumenänderung bei der Verbrennung.

$$\rho = \frac{\text{Volumen nach der Verbrennung}}{\text{Volumen vor der Verbrennung}} = \frac{\text{Vol.}(\text{CO}_2) + \text{Vol.}(\text{H}_2\text{O}) + \text{Vol.}(\text{N}_2)}{\text{Vol.}(\text{Kraftstoff}) + \text{Vol.}(\text{Luft})}$$

$$\rho = \frac{2 + 4 + \frac{3}{0,21} - 3}{2 + \frac{3}{0,21}} = 1,06$$

$$\rho = \frac{12 + 6 + \frac{15}{0,21} - 15}{2 + \frac{15}{0,21}} = 1,013$$

Molekulargewichte.

$$\text{O}_2 = 32; \text{CH}_3\text{O} = 32$$

$$\text{O}_2 = 32; \text{C}_6\text{H}_6 = 78$$

Methanol.

Benzol.

Notwendiger Sauerstoff.

$O_{2 \min} = \frac{3}{2} = 1,5 \text{ Mol/Mol Meth.}$	$O_{2 \min} = \frac{15}{2} = 7,5 \text{ Mol/Mol Be.}$
$O_{2 \min} = \frac{15 \cdot 24,42}{32} \text{ m}^3/\text{kg Meth.} \left[ \begin{smallmatrix} 15^\circ \\ \text{tata} \end{smallmatrix} \right]$	$O_{2 \min} = \frac{7,5 \cdot 24,42}{78} \text{ m}^3/\text{kg Be} \left[ \begin{smallmatrix} 15^\circ \\ \text{tata} \end{smallmatrix} \right]$
Molarvolumen bei 15°C u. tata = 24,42 m <sup>3</sup> /Mol.	

Notwendige Luftmenge.

$L_{\min} = \frac{O_{2 \min}}{0,21} = 5,46 \text{ m}^3/\text{kg Meth.} \left[ \begin{smallmatrix} 15^\circ \\ \text{tata} \end{smallmatrix} \right]$	$L_{\min} = \frac{O_{2 \min}}{0,21} = 11,2 \text{ m}^3/\text{kg Be} \left[ \begin{smallmatrix} 15^\circ \\ \text{tata} \end{smallmatrix} \right]$
$L_{\min} = \frac{5,46 \cdot 1 \cdot (273+46)}{0,95(273+15)} \text{ m}^3/\text{kg}$	$L_{\min} = \frac{11,2 \cdot 1 \cdot (273+77)}{0,95(273+15)} \text{ m}^3/\text{kg}$
$L_{\min} = 6,34 \text{ m}^3/\text{kg Meth.} \left[ \begin{smallmatrix} 46^\circ \\ 0,95 \end{smallmatrix} \right]$	$L_{\min} = 14,24 \text{ m}^3/\text{kg Be} \left[ \begin{smallmatrix} 77^\circ \\ 0,95 \end{smallmatrix} \right]$
$L = L_{\min} \cdot \lambda$	$L = L_{\min} \cdot \lambda$
$\lambda = 1, \quad L = 6,34 \text{ m}^3/\text{kg Meth.} \left[ \begin{smallmatrix} 46^\circ \\ 0,95 \end{smallmatrix} \right]$	$\lambda = 1, \quad L = 14,24 \text{ m}^3/\text{kg Be} \left[ \begin{smallmatrix} 77^\circ \\ 0,95 \end{smallmatrix} \right]$

Volumen von 1 kg Kraftstoffdampf.

$B \approx \frac{\text{Molarvolumen} \left[ \begin{smallmatrix} 15^\circ \\ \text{tata} \end{smallmatrix} \right]}{\text{Molekulargewicht}} \text{ m}^3/\text{kg} \left[ \begin{smallmatrix} 15^\circ \\ \text{tata} \end{smallmatrix} \right]$

$B \approx \frac{24,42 \cdot 1 \cdot (273+46)}{32 \cdot 0,95(273+15)} = 0,886 \text{ m}^3 \left[ \begin{smallmatrix} 46^\circ \\ 0,95 \end{smallmatrix} \right]$	$B \approx \frac{24,42 \cdot 1 \cdot (273+77)}{78 \cdot 0,95(273+15)} = 0,412 \text{ m}^3 \left[ \begin{smallmatrix} 77^\circ \\ 0,95 \end{smallmatrix} \right]$
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Gemischvolumen pro kg Kraftstoff.

$V_g = B + L = 7,226 \text{ m}^3/\text{kg Meth.} \left[ \begin{smallmatrix} 46^\circ \\ 0,95 \end{smallmatrix} \right]$	$V_g = B + L = 14,64 \text{ m}^3/\text{kg Be} \left[ \begin{smallmatrix} 77^\circ \\ 0,95 \end{smallmatrix} \right]$
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Gewicht des Gemisches.

$\alpha = 1 + \frac{5,46 \cdot 1293 \cdot 273 \cdot 735}{(273+15) \cdot 760} = 7,43 \text{ kg}$	$\alpha = 1 + \frac{11,2 \cdot 1293 \cdot 273 \cdot 735}{(273+15) \cdot 760} = 14,2 \text{ kg}$
-------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------

Methanol.

Benzol.

Kompression.

Gleichung der adiabatischen Kompression.

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{\kappa} \quad \left| \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{\kappa-1}$$

$$\kappa (\text{für Luft}) = 1.4$$

$$\underline{p_2 = 0.95 \cdot 8^{1.4} = 17.4 \text{ ata}}$$

$$\underline{T_2 = 319 \cdot 8^{0.4} = 733^\circ}$$

$$\underline{p_2 = 0.95 \cdot 8^{1.4} = 17.4 \text{ ata}}$$

$$\underline{T_2 = 350 \cdot 8^{0.4} = 805^\circ}$$

Verbrennung

$$\text{Verbrennungsgleichung: } H_u \approx G \cdot c_{vm} \cdot \Delta t.$$

$\Delta t$  = Temperaturzunahme  $t_3 - t_2$

$c_{vm}$  = mittlere spez. Wärme der Verbr.- Gase zw.  $T_1$  und  $T_3$

(geschätzt nach Schüle\*)

$$\Delta t = \frac{4650}{7.43 \cdot 0.29} = 2160^\circ \text{C}$$

$$\underline{T_3 = T_2 + \Delta t = 2893^\circ \text{ abs.}}$$

$$\Delta t = \frac{9590}{14.2 \cdot 0.29} = 2330^\circ \text{C}$$

$$\underline{T_3 = T_2 + \Delta t = 3135^\circ \text{ abs.}}$$

$$p_3 = \frac{G \cdot R \cdot T_3 \cdot \rho \cdot \epsilon}{V_g}$$

$$p_3 = \frac{7.43 \cdot 29 \cdot 2893 \cdot 1.06 \cdot 8}{7.226}$$

$$\underline{p_3 = 72.7 \text{ ata}}$$

$$p_3 = \frac{14.2 \cdot 29 \cdot 3135 \cdot 1.013 \cdot 8}{14.64}$$

$$\underline{p_3 = 71.2 \text{ ata}}$$

\* Schüle, „Neue Tabellen u. Diagramme für techn. Feuer-gase“ Seite 115.



Methanol.

-17-

Benzol.

Expansion.

Gleichung der adiabatischen Expansion.

$$\frac{p_3}{p_4} = \epsilon^{\kappa'} \quad \left| \quad \frac{T_3}{T_4} = \epsilon^{\kappa'-1}$$

$\kappa'$  geschätzt nach Schüle zu 1,24

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{72,7}{8^{1,24}} = 5,52 \text{ ata}$$
$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{2893}{8^{0,24}} = 1750^\circ$$

$$\frac{p_4}{p_3} = \frac{71,2}{8^{1,24}} = 5,38 \text{ ata}$$
$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{3135}{8^{0,24}} = 1900^\circ$$

Geleistete Arbeit.

(siehe Hütte I 25. Auflage S. 474.)

$$L = L_2 - L_1 = \frac{p_2 \cdot V_2}{\kappa' - 1} \left(1 - \frac{T_4}{T_3}\right) - \frac{p_1 \cdot V_1}{\kappa' - 1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$L_1 = \frac{17,4 \cdot 10^4 \cdot 7,226}{0,4 \cdot 8} \left(1 - \frac{319}{733}\right)$$

$$L_2 = \frac{72,7 \cdot 10^4 \cdot 7,226}{0,24 \cdot 8} \left(1 - \frac{1750}{2893}\right)$$

$$L_2 = 1,08 \cdot 10^6 \text{ mKg}$$

$$L_1 = 0,122 \cdot 10^6 \text{ mKg}$$

$$L = 0,858 \cdot 10^6 \text{ mKg}$$

$$L_1 = \frac{17,4 \cdot 10^4 \cdot 7,226}{0,4 \cdot 8} \left(1 - \frac{350}{805}\right)$$

$$L_2 = \frac{71,2 \cdot 10^4 \cdot 7,226}{8 \cdot 0,24} \left(1 - \frac{1900}{3135}\right)$$

$$L_2 = 2,14 \cdot 10^6 \text{ mKg}$$

$$L_1 = 0,449 \cdot 10^6 \text{ mKg}$$

$$L = 1,691 \cdot 10^6 \text{ mKg}$$

Thermischer Wirkungsgrad.

$$\eta_{th} = \frac{R \cdot L}{H_u}$$

$$\eta_{th} = \frac{0,858 \cdot 10^6}{427 \cdot 4650} = 0,432$$

$$\eta_{th} = \frac{1,691 \cdot 10^6}{427 \cdot 9590} = 0,413$$

Mittlerer theoretischer Kolbendruck.

$$p_{mi} = \frac{L \cdot \epsilon}{V_g (\epsilon - 1)}$$

$$p_{mi} = 13,5 \text{ ata}$$

$$p_{mi} = 13,2 \text{ ata}$$