

Luit

Schiffmanufaktur

T

M-25-

A. D. I. (K) 3093.

507

## AUSWERTUNG DER VERBRENNUNGSGLEICHUNG

Von F. Penzig

Allgemeine Verbrennungsgleichung — Luftbedarf, allgemein; Luftbedarf der Kohlenwasserstoffe; Luftbedarf der einwertigen Alkohole — Kohlen-säurebildung, allgemein; Kohlensäurebildung der Kohlenwasserstoffe; Kohlensäurebildung der einwertigen Alkohole — Verbrennungswasser, allgemein; Verbrennungswasser der Kohlenwasserstoffe; Verbrennungswasser der einwertigen Alkohole — Volumenvergrößerung, allgemein; Volumenvergrößerung bei Kohlenwasserstoffen; Volumenvergrößerung bei Alkoholen — Heizwert.

Equazione generale della combustione — Fabbisogno d'aria in generale; fabbisogno d'aria degli idrocarburi; fabbisogno d'aria dei composti monovalenti alcoolici — Formazione d'acido carbonico, in generale; formazione di acido carbonico degli idrocarburi; formazione di acido carbonico degli alcool monovalenti — Acqua di combustione, in generale; acqua di combustione degli idrocarburi; acqua di combustione degli alcool monovalenti — Aumento di volume, in generale; aumento di volume negli idrocarburi; aumento di volume nel caso di alcool — Potere calorifico.

L'équation de combustion en général — Volume d'air nécessaire, en général; pour les carbures d'hydrogène; pour les alcools monovalents — Formation d'acide carbonique, en général; pour les carbures d'hydrogène; pour les alcools monovalents — Eau de combustion, en général; pour les carbures d'hydrogène; pour les alcools monovalents — Augmentation de volume, en général; pour les carbures d'hydrogène; pour les alcools — Pouvoir calorifique.

General combustion equation — Air required, general; air required by hydro-carbon; air required by the monovalent alcohols — Formation of carbonic acid, general; formation of carbonic acid of hydro-carbon; formation of carbonic acid of monovalent alcohols — Combustion-water, general; combustion-water of hydro-carbon; combustion-water of the monovalent alcohols — Volume augmentation, general; volume augmentation of hydro-carbon; volume augmentation of alcohols — Heating value.

### Einleitung

Bei motorischen Versuchen mit Kraftstoffen wird man oft in die Lage kommen, Werte wie

- Luftbedarf,
- CO<sub>2</sub> max.,
- Verbrennungswasser,
- Volumenvergrößerung,
- Heizwert,

zu berechnen, oder doch wenigstens zu schätzen. Es ist nun zweckmäßig, am Verhalten reiner Stoffe — mit denen man bei systematischen Versuchen oft genug zu tun hat — zu zeigen, wovon die erwähnten Daten abhängen und wie sich bestimmte Gruppen von Kohlenwasserstoffen und Alkoholen verhalten. Daß hierbei die Rechnung in einiger Breite dargelegt wird, kann als Vorteil angesehen werden; denn die Handbücher bringen meist nur die Schlußformeln, so daß demjenigen, der nicht ständig mit diesen Dingen zu tun hat, der Zusammenhang fehlt.

Es wird nun gezeigt, daß der Luftbedarf, die Kohlensäure und das Verbrennungswasser lediglich vom Verhältnis H/C abhängen und einfache Schaubilder möglich sind, die für alle, also auch für die technischen Stoffe, Gültigkeit haben. Bei der Vermehrung des Volumens, die durch die Verbrennung entsteht, verhalten sich bestimmte Gruppen von Kohlenwasserstoffen ganz verschieden, das Verhältnis H/C gestattet jedoch die Berechnung. Beim Heizwert dagegen spielt der Aufbau des Moleküls eine so wichtige Rolle, daß eine Berechnung lediglich aus dem Verhältnis H/C nicht möglich ist.

Interessant ist, daß alle Darstellungen einen ausgezeichneten Punkt haben, in dem sich die Eigenschaften der Paraffine, Olefine, Alkohole und mit wachsender Zunahme der Seitenketten auch die der Aromaten treffen. Dies hängt damit zusammen, daß alle Gruppen mit zunehmender Gliederzahl dem einfachen Verhältnis C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub> zustreben.

Als Grundlage der Darstellungen dient das Gewichtsverhältnis [H/C]. Eine Leiter, H 100/H + C gestattet die Ablesung, wenn der Wasserstoffgehalt in Prozent gegeben ist. Diese Leiter gilt nicht für die Alkohole. Die an den Kurven angeschriebenen Zahlen bedeuten die Zahl der C-Atome.

### A. Allgemeine Verbrennungsgleichung

Bezeichnet man mit

- m = Anzahl der C-Atome,
- n = Anzahl der H-Atome,

- p = Anzahl der O-Atome,
- s = Anzahl der S-Atome<sup>1</sup>,

so ergibt sich z. B. Äthylalkohol C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH m = 2, n = 6, p = 1.

Die Verbrennungsgleichung lautet in Kilogramm:

a) Aufgewandt:

$$\begin{aligned} & (m \cdot 12 \text{ kg C} + n \cdot 1 \text{ kg H} + p \cdot \frac{32}{2} \text{ kg O}_2 + s \cdot \frac{32}{2} \text{ kg S}) + \text{(Kraftstoff)} \\ & (m \cdot 32 \text{ kg O}_2 + \frac{n \cdot 32}{2} \text{ kg O}_2 - p \cdot \frac{32}{2} \text{ kg O}_2 + s \cdot 3 \cdot \frac{32}{2} \text{ kg O}_2) + \text{(Sauerstoff)} \\ & (m + \frac{n}{4} - p \cdot \frac{1}{2} + s \cdot \frac{3}{2}) \cdot \frac{32 \cdot 76,7}{23,3} \text{ kg N}_2 \text{ (Stickstoff)} \end{aligned}$$

b) Erhalten:

$$\begin{aligned} & m \cdot 44 \text{ kg CO}_2 + \frac{n}{2} \cdot 18 \text{ kg H}_2\text{O} \pm 0 \text{ kg O}_2 + s \cdot 80 \text{ kg SO}_2 \\ & + (m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \cdot \frac{3}{2}) \cdot \frac{32 \cdot 76,7}{23,3} \text{ kg N}_2 \end{aligned}$$

Bei der Errechnung des eingebrachten Stickstoffs wurden folgende Verhältnisse benutzt:

	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Gewichtsteile . . . . .	0,233	0,767
Raumteile . . . . .	0,210	0,790

Die linke Seite der Gleichung lautet vereinfacht:

$$\begin{aligned} c_1) & m \cdot 12 \text{ kg C} + n \cdot 1 \text{ kg H} + p \cdot 16 \text{ kg O} + s \cdot 32 \text{ kg S} \\ & + (m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \cdot \frac{3}{2}) \cdot 32 \text{ kg Sauerstoff, oder} \\ c_2) & m \cdot 12 \text{ kg C} + n \cdot 1 \text{ kg H} + p \cdot 16 \text{ kg O} + s \cdot 32 \text{ kg S} \\ & + (m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \cdot \frac{3}{2}) \cdot \frac{32}{0,233} \text{ kg Luft} \\ c_3) & m \cdot 12 \text{ kg C} + n \cdot 1 \text{ kg H} + p \cdot 16 \text{ kg O} + s \cdot 32 \text{ kg S} \\ & + (m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \cdot \frac{3}{2}) \cdot \frac{32 \cdot 24,42}{0,233 \cdot 28,95} \text{ m}^3 \text{ Luft (735 mm Hg, 15°C)} \end{aligned}$$

### B. Luftbedarf, allgemein:

$$\begin{aligned} a) & \text{ bez. auf 1 Mol } (m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \cdot \frac{3}{2}) \cdot \frac{32}{0,233} \text{ Mol Kraftst.} \\ & (m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \cdot \frac{3}{2}) \cdot 137,25 \text{ kg Luft} \\ b) & \text{ bez. auf 1 kg } \frac{(m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \cdot \frac{3}{2}) \cdot 137,25}{m \cdot 12 + n + p \cdot 16 + s \cdot 32} \text{ kg Kraftst.} \end{aligned}$$

<sup>1</sup> Der Schwefel wurde hier lediglich der Vollständigkeit halber angeführt. Er ist in üblichen Kraftstoffen in so geringen Mengen vorhanden, daß er keine Rolle spielt.

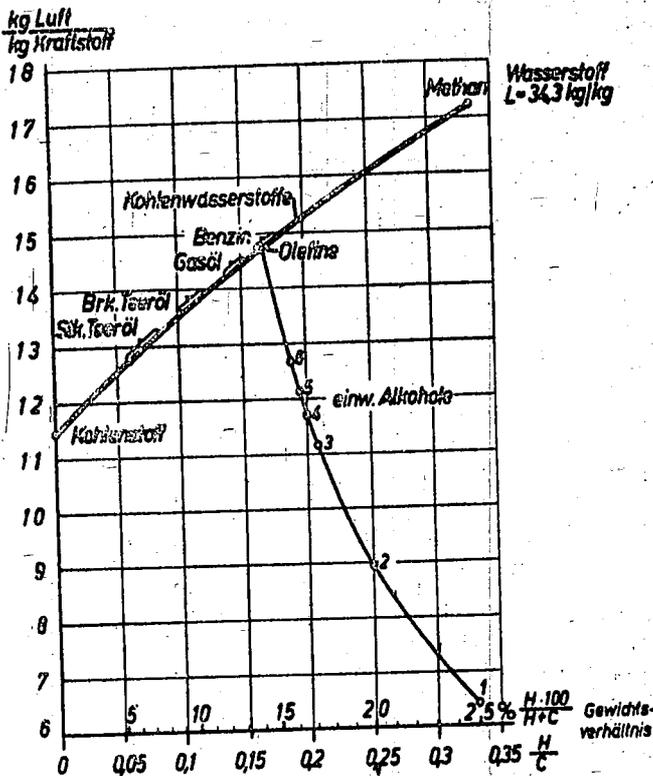


Abb. 1. Luftbedarf reiner Kohlenwasserstoffe

**B<sub>2</sub> Luftbedarf der Kohlenwasserstoffe:**

Für reine Kohlenwasserstoffe wird  $p = 0$  und  $s = 0$ ,  $m$  und  $n$  stehen in folgendem Verhältnis:

$$\frac{n}{12m} = \left[ \frac{H}{C} \right] = \text{Gewichtsverhältnis}$$

Die vereinfachte allgemeine Gleichung (B<sub>1b</sub>)

$$\frac{(m + \frac{n}{4}) 137,25}{m12 + n} \text{ kg Luft} / \text{kg Kraftstoff}$$

kann umgewandelt werden in:

$$a) \frac{3 \left[ \frac{H}{C} \right] + 1}{\left[ \frac{H}{C} \right] + 1} 11,44 \text{ kg Luft} / \text{kg Kraftstoff}$$

Für reinen Kohlenstoff gilt

$$n = 0 \text{ und } \left[ \frac{H}{C} \right] = 0 \text{ Luftbedarf } 11,44 \text{ kg/kg}$$

Für reinen Wasserstoff gilt

$$m = 0 \text{ und } \left[ \frac{H}{C} \right] = \infty \text{ Luftbedarf } 34,3 \text{ kg/kg}^a$$

Nach der Gleichung B<sub>2a</sub> ist in Abb. 1 der Luftbedarf der reinen Kohlenwasserstoffe dargestellt in Abhängigkeit vom Verhältnis [H/C] beginnend mit Kohlenstoff und endigend mit Methan. Einen ausgezeichneten Punkt stellen die Olefine dar, die nach der Formel C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub> aufgebaut sind und sämtlich ein [H/C]-Verhältnis  $\frac{1}{6} = 0,167$  haben.

aus Gleichung B<sub>1b</sub>

Zwischen diesem Punkt und Methan liegen die Paraffinkohlenwasserstoffe C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>. Vom Methan ausgehend, streben die Stoffe dieser Reihe auf den Punkt C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub> zu, da bei den hochmolekularen Körpern das additive Glied 2, die endständigen H-Atome, das H/C-Verhältnis immer weniger beeinflussen.

Zwischen reinem Kohlenstoff und den Olefinen liegen alle übrigen Kohlenwasserstoffe. Die ungefähre Lage technischer Produkte, wie Teeröl, Gasöl, Benzin, ist angedeutet.

**B<sub>3</sub> Luftbedarf der einwertigen Alkohole:**

Von den Nicht-Kohlenwasserstoffen sind die einwertigen Alkohole ebenfalls in Abhängigkeit vom [H/C]-Verhältnis dargestellt (Gleichung B<sub>1b</sub>,  $p = 1$ ,  $s = 0$ ). Beginnend mit Methylalkohol, der dasselbe H/C-Verhältnis hat wie Methan, strebt die Kurve dem Punkt C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub> zu, da das Atom Sauerstoff bei den höheren Alkoholen immer weniger in Erscheinung tritt.

**C<sub>1</sub> Kohlensäurebildung, allgemein:**

Die rechte Seite der Hauptgleichung, darstellend die Verbrennungserzeugnisse, lautet (A<sub>1</sub>):

$$m44 \text{ kg CO}_2 + \frac{n}{2} 18 \text{ kg H}_2\text{O} + s80 \text{ kg SO}_2 + (m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \frac{3}{2}) \frac{32 \cdot 76,7}{23,3} \text{ kg N}_2$$

Ausgedrückt in Raumentellen:

$$m \text{ Mol CO}_2 + \frac{n}{2} \text{ Mol H}_2\text{O} + s \text{ Mol SO}_2 + (m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \cdot \frac{3}{2}) \frac{32}{28} \cdot \frac{76,7}{23,3} \text{ Mol N}_2$$

Gehalt des trockenen Abgases an Kohlensäure bei vollständiger Verbrennung:

$$\frac{m}{m + s + (m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \frac{3}{2}) \cdot 3,76} = \text{CO}_2 \text{ max. allgemein}$$

**C<sub>2</sub> Kohlensäurebildung der Kohlenwasserstoffe:**

$$p = 0, \quad s = 0, \quad n = 12m \left[ \frac{H}{C} \right]$$

$$\frac{m}{m + (m + \frac{n}{4}) 3,76} = \frac{1}{1 + (1 + 3 \left[ \frac{H}{C} \right]) 3,76} = \text{CO}_2 \text{ max. bei Kohlenwasserstoffen.}$$

Für reinen Kohlenstoff gilt  $n = 0$ ,  $\left[ \frac{H}{C} \right] = 0$ ,  $\text{CO}_2 \text{ max.} = 21 \%$ .

In Abb. 2 ist die Kohlensäurebildung der reinen Kohlenwasserstoffe und der einwertigen Alkohole dargestellt.

**C<sub>3</sub> Kohlensäurebildung der einwertigen Alkohole:**

Alle diese Alkohole haben bei verschiedenem Luftbedarf den gleichen Gehalt an CO<sub>2</sub> im Endgas. Dieser Gehalt ist der gleiche wie bei den Olefinen, deren Luftbedarf untereinander gleich ist und dem sich der des Alkohols mit wachsender Gliederzahl n nähert. Die Alkohole lassen sich durch die Formel darstellen



Setzt man die allgemeine Formel (C<sub>1</sub>) ein

$$s = 0, p = 1, n = 2m + 2,$$

so erhält man

$$\frac{m}{m + (m + \frac{2m + 2}{4} - \frac{1}{2}) \cdot 3,76} = CO_2 \text{ max.}$$

gleich

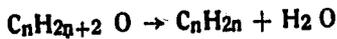
$$\frac{m}{m + 3,76m + \frac{1}{2}m \cdot 3,76 + \frac{1}{2} \cdot 3,76 - \frac{1}{2} \cdot 3,76} = CO_2 \text{ max.}$$

Daraus, daß die letzten beiden Glieder des Nenners sich aufheben und der ganze Ausdruck durch m gekürzt werden kann, ergibt sich

$$CO_2 \text{ max. bei einwertigen Alkoholen } \frac{1}{6,64} = 0,1505$$

Die Abgase aller einwertigen Alkohole haben also einen Gehalt von 15,05 % CO<sub>2</sub>.

Zur Erklärung dieser Tatsache kann man sich vorstellen, daß der Alkohol zunächst vollständig in sich verbrennt:



Für das restliche Glied C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub> tritt dann eine Verbrennung ein, die notwendigerweise bei allen [H/C]-Verhältnissen zum gleichen CO<sub>2</sub>-Gehalt führt, der wiederum dem bei der Verbrennung der Olefine entspricht.

Die Luftersparnis durch vorhandenen Sauerstoff ist übrigens auch der Grund, weshalb der Luftbedarf der Alkohole so sehr viel niedriger ist als der der entsprechenden Kohlenwasserstoffe.

### D<sub>1</sub> Verbrennungswasser, allgemein

Das bei der Verbrennung von 1 kg Kraftstoff anfallende Verbrennungswasser errechnet sich zu:

(2. Glied d. Gl. A, b) : (1. Teil d. Gl. A, a)

$$\frac{\frac{n}{2} \cdot 18}{m \cdot 12 + n \cdot 1 + p \cdot 16 + s \cdot 32} = \frac{\text{kg Wasser}}{\text{kg Kraftstoff}} \text{ allgemein}$$

### D<sub>2</sub> Verbrennungswasser der Kohlenwasserstoffe:

$$p=0 \quad s=0 \quad n=12m \left[ \frac{H}{C} \right]$$

$$\frac{n \cdot 9}{m \cdot 12 + n \cdot 1} = \frac{9 [H/C]}{1 + [H/C]} = \frac{\text{kg Wasser}}{\text{kg Kraftstoff}} \text{ bei K. W.}$$

Für reinen Wasserstoff gilt 2 kg H<sub>2</sub> + 16 kg O<sub>2</sub> = 18 kg H<sub>2</sub>O, also 9 kg Wasser je kg Wasserstoff.

### D<sub>3</sub> Verbrennungswasser der einwertigen Alkohole:

Setzt man in die allgemeine Formel (D<sub>1</sub>) ein

$$s = 0, p = 1, \text{ so erhält man,}$$

wenn man den für einwertige Alkohole gültigen Ausdruck n = 2m + 2 einsetzt:

$$\frac{9m + 9}{7m + 9} \frac{\text{kg Wasser}}{\text{kg Kraftstoff}} \text{ bei einwertigen Alkoholen.}$$

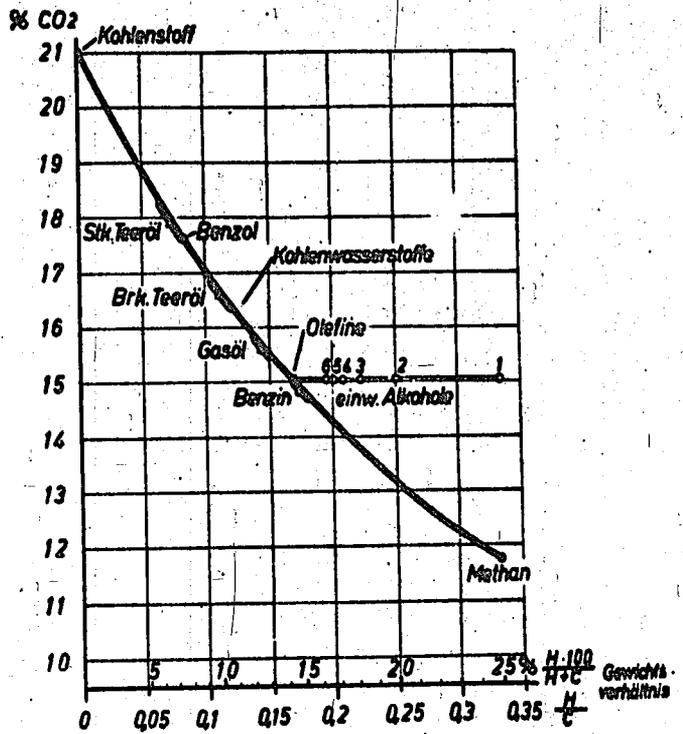
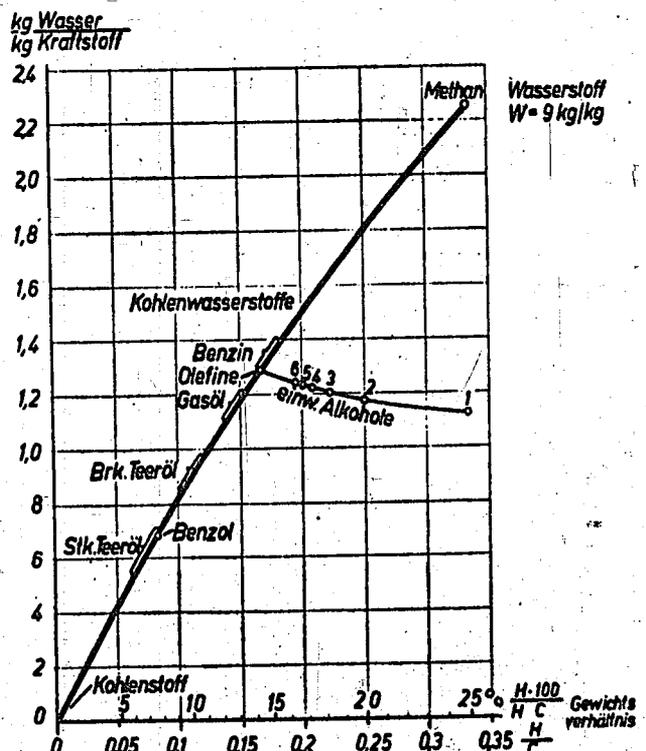


Abb. 2. Kohlendioxidbildung

Die Darstellung in Abb. 3 zeigt, daß bei Methylalkohol (CH<sub>3</sub>OH) nur halb so viel Wasser gebildet wird, wie bei Methan (CH<sub>4</sub>). Es erklärt sich daraus, daß beide Moleküle die gleiche Anzahl H-Atome haben, also die gleiche Gewichtsmenge Wasser bilden können, daß aber das Gewicht des Moleküls vom Methylalkohol doppelt so hoch ist als das von Methan. Die Tatsache, daß das Sauerstoffatom das Molekulargewicht des Alkohols verdoppelt gegenüber den entsprechenden Kohlenwasserstoffen gilt selbstverständlich nur für Methanol. Bei zunehmender Molekülgröße spielt das O-Atom eine immer geringere Rolle, so daß das Ver-

Abb. 3. Anfallendes Verbrennungswasser



510

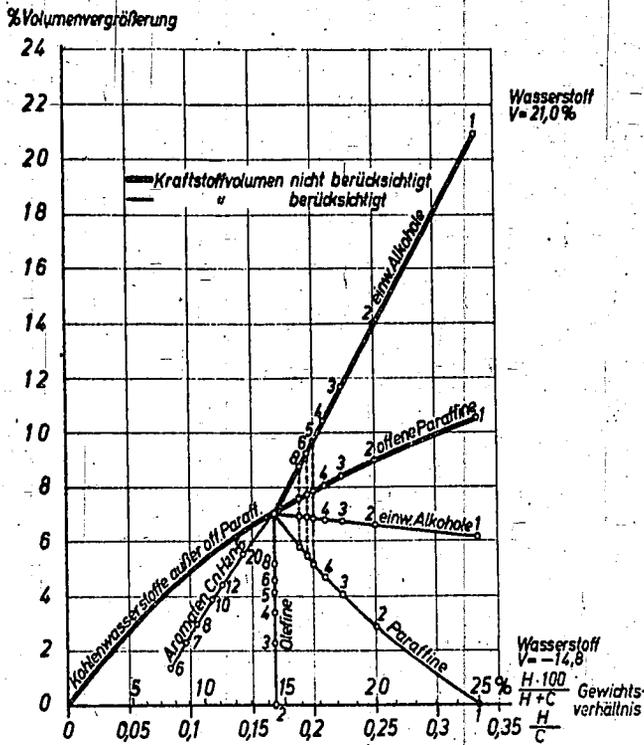


Abb. 4. Volumenvergrößerung

brennungswasser je kg Kraftstoff wächst. Gleichzeitig sinkt aber der Einfluß der endständigen Glieder überhaupt, so daß die Kurve der Alkohole in die Kurve der reinen Kohlenwasserstoffe bei der Stelle  $C_{11}H_{22}$  einmündet.

**E<sub>1</sub> Volumenvergrößerung, allgemein:**

Unter Volumenvergrößerung wird verstanden:

$$\frac{\text{Unterschied der Volumen nach und vor der Verbrennung}}{\text{Volumen vor der Verbrennung}} = V$$

Beide Volumen sind dabei auf gleichen Zustand bezogen. Gewöhnlich wird dabei der Kraftstoff und auch das Wasser als gasförmig angenommen. Für den Kraftstoff kann dies nur für den besten Vergaser gelten. Beim schlechtesten Vergaser dagegen wird der Kraftstoff flüssig in den Zylinder gelangen, sein Volumen kann dann gegenüber dem Gasvolumen vernachlässigt werden. Wird schließlich der Kraftstoff erst nach Schluß der Ventile in den Zylinder eingespritzt, wie z. B. beim Hesselman-Motor, so kann er das Anfangsvolumen nicht vergrößern und erscheint dann auch hier in der Rechnung nicht. Die Rechnung hat also zwei Grenzfälle zu prüfen:

- a) Idealer Vergaser. Der Kraftstoff kann näherungsweise als permanentes Gas angesehen werden.
- b) Spät einspritzung oder schlechter Vergaser. Der Kraftstoff beeinflusst nicht das Anfangsvolumen, oder kann, da flüssig, in seinem Volumen vernachlässigt werden.

$$V = \frac{CO_2 + H_2O_{Dpf.} + SO_2 - (\text{Kraftst.} + O_2)}{\text{Kraftstoff} + O_2}$$

Ausgedrückt in Molen (vgl. Gleichung A<sub>1</sub> und A<sub>2</sub>).

$$V = \frac{m + \frac{n}{2} + s - \text{Nenner}}{1 + m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \frac{3}{2}}$$

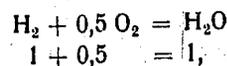
$$c) \quad V_{\text{Sauerstoff}} = \frac{\frac{n}{4} + \frac{p}{2} - \frac{s}{2} - 1}{1 + m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \frac{3}{2}} \quad \text{Verbrennung in Sauerst.}$$

Dieser Ansatz gilt nur für die Verbrennung in reinem Sauerstoff. Für Verbrennung in Luft sind die im Nenner den Sauerstoff darstellenden Werte zu vergrößern um

$$\frac{100}{21} = 4,76$$

$$d) \quad V_{\text{Luft}} = \frac{\frac{n}{4} + \frac{p}{2} - \frac{s}{2} - 1}{1 + 4,76 \left( m + \frac{n}{4} - \frac{p}{2} + s \frac{3}{2} \right)} \quad \text{Verbrennung in Luft.}$$

Bei der Verbrennung von Wasserstoff tritt eine Verminderung des Volumens ein. Dies zeigt die Knallgasreaktion



also eine Verminderung auf zwei Drittel. Auf Luft bezogen, ergibt sich

$$\frac{1 - 1,5}{1 + 4,76 \cdot 0,5} = -14,8 \%$$

**E<sub>2</sub> Volumenvergrößerung bei Kohlenwasserstoffen:**

$$p=0 \quad s=0$$

$$a) \quad V = \frac{\frac{n}{4} - 1}{1 + 4,76 \left( m + \frac{n}{4} \right)} \quad \text{Kraftstoffvolumen berücksichtigt.}$$

Dieser Ausdruck kann keine für alle Kohlenwasserstoffe gültige Form erhalten, jedoch sind graphische Darstellungen für bestimmte Gruppen möglich:

Es gilt z. B. für

$$\text{Paraffine } C_mH_{2m+2} = \frac{m - 1}{14,28 m + 6,76}$$

$$\text{Olefine } C_mH_{2m} = \frac{m - 2}{14,28 m + 2}$$

$$\text{Aromaten } C_mH_{2m-6} = \frac{m - 5}{14,28 m - 12,28}$$

Die so errechneten Kurven sind in Abb. 4 dargestellt. Die Formeln lassen bereits erkennen, daß Methan (CH<sub>4</sub>, m = 1) und Äthylen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, m = 2) den Wert 0, also keine Volumenvergrößerung ergeben, und es ist zu sehen, daß ganz allgemein die kleinsten Moleküle einer jeden Reihe die geringste Volumenvermehrung ergeben. Je größer die Moleküle werden, desto mehr nähert sich ihr Gewichtsverhältnis [H/C] dem Wert  $\frac{2}{12} = 0,167$ . Die Gleichungen lassen auch erkennen, daß bei sehr großen Molekülen die additiven Glieder zu vernachlässigen sind und die Gleichungen übereinstimmend die Form annehmen:

$$V = \frac{1}{14,28} = 0,0702 = 7,02 \%$$

Die Kurven laufen dementsprechend im Punkt [H/C] = 0,1667 und V = 7,02 % zusammen. Bei diesem Grenzfall tritt auch das

Volumen des Kraftstoffes nicht mehr in Erscheinung, so daß dieser Punkt auf der im folgenden beschriebenen Kurve liegt.

Die Gleichung  $E_{2a}$  stellt die Verhältnisse bei idealer Vergasung des Kraftstoffes dar. Sind die unter  $E_{1b}$  genannten Bedingungen gegeben, so kann das Volumen des Kraftstoffes vernachlässigt werden und aus Gleichung  $E_{2a}$  wird dann

b) 
$$V = \frac{n}{19,04 \left(m + \frac{n}{4}\right)}$$
 Kraftstoffvolumen vernachlässigt.

Für reinen Kohlenstoff ergibt sich in diesem Fall keine Volumenvermehrung, denn für jedes verbrauchte Mol  $O_2$  wird ein neues Mol  $CO_2$  gebildet. Für Wasserstoff ( $m = 0, n = 2$ ) errechnet sie sich zu 21 %.

Diese Gleichung kann durch Einsetzen von  $n = 12 \left[\frac{H}{C}\right]$  übergeführt werden in

c) 
$$V = \frac{[H/C]}{1,59 + 4,76 [H/C]}$$
 Kraftstoffvolumen vernachlässigt.

Diese für alle Kohlenwasserstoffe gültige Abhängigkeit ist ebenfalls in Abb. 4 dargestellt.

**E<sub>3</sub> Volumenvergrößerung bei Alkoholen:**

Aus  $E_{1d}$  erhält man unter Einsatz von  $s = 0, p = 1$ .

$$V = \frac{\frac{n}{4} + \frac{1}{2} - 1}{1 + 4,76 \left(m + \frac{n}{4} - \frac{1}{2}\right)}$$

Für einwertige Alkohole  $C_mH_{2m+2}O$  gilt  $n = 2m + 2$

a) 
$$-V = \frac{m}{14,28m + 2}$$
 Kraftstoffvolumen berücksichtigt.

Kann das Kraftstoffvolumen vernachlässigt werden, so beträgt die Volumenvergrößerung:

b) 
$$V = \frac{m + 2}{14,28m}$$
 Kraftstoffvolumen vernachlässigt.

Die Kurven für die Alkohole sind gleichfalls in Abb. 4 eingetragen. Bemerkenswert ist, daß die Volumenvermehrung je nach der Anwendungsart bei den Alkoholen sehr viel stärker verschieden ist als bei den Kohlenwasserstoffen. Die an Motoren stets beobachtete Mehrleistung ist zum Teil auf diesen Umstand zurückzuführen, denn selbst bei Saughubeinspritzung wird der hohen Verdampfungswärme wegen stets ein gewisser Teil des Alkohols auch nach Schluß der Ventile sich in flüssigem Zustand befinden.

Unter den Alkoholen zeichnet sich der seiner hohen Verdampfungswärme wegen auffällige Methylalkohol dadurch aus, daß er die höchste Volumenvermehrung besitzt, die der des flüssigen Wasserstoffes gleichkommt.

**F Heizwert:**

Die Heizwerte sind der Rechnung nicht aus dem Gewichtsverhältnis  $H/C$  zugänglich. In Abb. 5 sind die Heizwerte der wesentlichsten Kohlenwasserstoffe dargestellt. Aus dem Verhalten der Olefine und der Acetylene geht hervor, daß die Art des Auf-

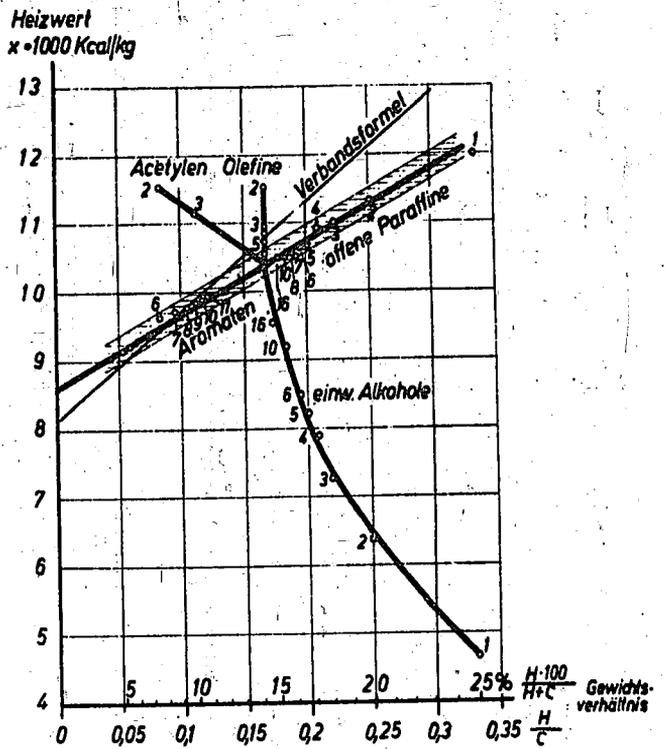


Abb. 5. Heizwerte (Zeichnungen des Verfassers)

baues, für die hier die mehrfachen Bindungen wesentlich sind, einen erheblichen Einfluß ausüben.

Läßt man diese Sonderfälle außer acht und betrachtet die üblichen Kraftstoffe, deren Heizwerte in das eingetragene Streuband fallen, so ist man versucht, eine Näherungsformel zur Berechnung aus C und H aufzustellen. Hierfür wird nach der „Verbandsformel“ vorgeschlagen, die Kohlenwasserstoffe als physikalische Gemische aus C ( $H = 8100$  kcal/kg) und H ( $H_{11} = 29000$  kcal/kg) aufzufassen. Die eingetragene Kurve zeigt, daß diese Formel nicht befriedigt und im Bereich üblicher Kraftstoffe einen um etwa 4 % zu hohen Wert angibt. Eine bessere Annäherung wird erzielt, wenn man willkürlich einsetzt:

Wasserstoff  $H_{11} = 22500$  kcal/kg  
 Kohlenstoff  $H_{11} = 8600$  kcal/kg

Damit ist jedoch nicht viel gewonnen, denn die möglichen Abweichungen sind so groß, daß man einfacher schätzt für:

Benzine	10 400 kcal/kg
Gasöle	10 200 kcal/kg
stark aromatische Benzine	10 000 kcal/kg
Aromaten	9 000—9 700 kcal/kg
Teeröle	9 000—9 400 kcal/kg

Der dabei mögliche Fehler beträgt 1 oder 2 %, fällt also kaum ins Gewicht. Für genauere Untersuchungen ist die experimentelle Bestimmung unerlässlich.

Die Heizwerte der Alkohole sind zur Vervollständigung ebenfalls in Abb. 5 eingetragen. Es ist bemerkenswert, daß sie in bezug auf den Heizwert erst bei einer sehr viel höheren C-Atomzahl den großen Paraffinen ähnlich werden, als dies in bezug auf den Luftbedarf, das Verbrennungswasser oder die Volumenvergrößerung der Fall ist. Während dort die einfache elementare Zusammensetzung bestimmend ist, entscheidet hier der den Heizwert vermindernde Einfluß der Hydroxylgruppe OH. [68]