Erscheint zweimal monatlich
Bezugspreis 4 M. vierteljährl.

Anzeigenpreise nach Tarif
Preis des Einzelheftes 70 Pfg.

MASCHINEN-KONSTRUKTEUR

ZEITSCHRIFT FÜR BETRIEB u. KONSTRUKTION

BEGRÜNDET 1868 VON W. H. UHLAND • VERLAG J. J. ARND, LEIPZIG C1

62. JAHRG. 1929 15. April NUMMER 8

Inhalt:

liegenden Falle aus dem Härteofen, dem Ölhärtebad und dem Anlaßofen, deren Anordnung dem Arbeitsgang entsprechend hintereinander erfolgt. Die Zuführung der Arbeitsstücke zu dem Härteofen geschieht durch Zubringerschienen, die die Achsen in gleichmäßig verteilten Abständen aufnehmen. Durch den Ofen hindurch werden die Achsen mit einem wagerecht und senkrecht beweglichen Rost ruckweise bewegt, derart, daß letzterer beim Aufwärtshub die in den Führungsschienen ruhende vorderste Achse aufgreift und in der Höhe der oberen Hubstellung um 150 mm wagerecht vorträgt, um bei abwärtsgehendem Hub die Achsen auf zwei parallel zur Längsachse des Ofens verlaufende Auflagen niederzulegen. Der Rost senkt sich alsdann weiter, bis er unter den Auflagen verschwindet, und kehrt in dieser unteren Hubstellung in wagerechter Richtung in die Ausgangslage zurück. Dieses Spiel wiederholt sich in fortwährendem Kreislauf, wobei alle bereits im Ofen befindlichen Achsen gleichzeitig während des Vorwärtshubes des Rostes um 150 mm vorbewegt werden und eine weitere Achse aus den Zubringerschienen entnommen wird. Die Steuerung des Rostes geschieht durch Kurvenscheiben in Verbindung mit an der Unterseite des Rostes angebrachten Sätteln, welche Längenänderungen des Rostes nach der Längs- und Seitenrichtung infolge der Wärme ausgleichen.

Das Abheben der Achsen von den Auflagen im Ofen und Zuführen in das Ölhärtebad geschieht durch zwei durch Gegengewichte ausgeglichene Arme, die beim Abgleiten der Achsen durch die Wirkung der Gegengewichte sofort in ihre Ausgangslage zurückkehren, um die nächste Achse aufzugreifen.

Aus dem Ölbad werden die Achsen durch eine Kette mit besonders ausgebildeten Greifern herausgeholt und dem Anlaßofen zugeführt. Die weitere Führung durch diesen Ofen übernimmt eine besondere Fördereinrichtung mit schräg zur Längs- und Querachse des Ofens und schaufelartig angeordneten Trägern, die durch Kette und Kettenräder angetrieben werden. Aus dem Anlaßofen fallen die Achsen eine neben die andere in bereitstehende Karren, die sie in die Putzerei bringen.

Zum Antreiben der Beschickungsanlage dienen Wechselstrommotoren mit veränderlicher Tourenzahl, die eine Veränderung der Dauer der Wärmebehandlung von ein bis zwei Stunden gestatten. Die weitere Übertragung der Bewegung auf den beweglichen Rost des Härteofens geschieht durch Zahnräderübersetzung, auf den Ölbad- und Anlaßofen-Konveyor durch Kettengetriebe.

Thermodynamik der Rakete.

Zum Aufsatz von Oberbaurat Konrad Baetz.

Von Ingenieur Guido v. Pirquet.

In Anbetracht der enormen Wichtigkeit des Raketenproblems und der Thermodynamik der Rakete hat die Schriftleitung Veranlassung genommen, einige prominente Pioniere auf diesem Gebiet zu bitten, Stellung zu nehmen zu den Ausführungen des Herrn Oberbaurat Prof. Baetz in Nr. 3 dieser Zeitschrift. Nachstehend folgt, nachdem die Herren Scherschevsky und Ley in Nr. 6 zu Worte gekommen sind, eine Ausführung des Herrn Guido v. Pirquet, Wien.

In dem Artikel von Herrn Oberbaurat Baetz in Nr. 3 des MK finde ich, daß meine Arbeiten darin mehrfach unrichtig zitiert sind. Da es sich dabei um Zahlen handelt, die für die Kosmonautik wesentlich sind, bitte ich um Aufnahme des Artikels[1]) nebst erläuterndem Anhang.

Die ideelle und die effektive Mündungsgeschwindigkeit von c_i und c.

Der wichtige Abschnitt: Die ideelle und die effektive Mündungsgeschwindigkeit c_i und c soll im folgenden etwas genauer besprochen werden.

Bezeichnungen:

c oder c_e effektive Mündungsgeschwindigkeit (m/sek).
c_i = ideelle Mündungsgeschwindigkeit.
c_{it} = totale ideelle Mündungsgeschwindigkeit.
c_h = hypothetische Mündungsgeschwindigkeit.
T = absolute Temperatur.
μ = Molekulargewicht.
$\alpha\,\omega$ (Alpha und Omega) = Indices für den Anfangs- und Endzustand (also T_α Anfangs-, T_ω Mündungstemperatur usw.).
p = Druck in at (kg/cm²).
v = spezifisches Volumen (l/g).
k = Koeffizient $k = \frac{c_p}{c_v}$.
k_m = Mittelwert von k.
c_p = spezifische Wärme bei konstantem Druck.
c_v = spezifische Wärme bei konst. Volumen.
En_e = Energie (Cal/kg).
g_0 = terr. Beschleunigung,
= $9 \cdot 80$ m/sek² (Mittelwert auf der ganzen Erdoberfläche).
B $= 1 - T/T_\alpha$
Gradient der Expansion.

Aus der Arbeitsfläche für expandierende Gase (Adiabate) erhält man die in Bewegungsenergie umgesetzte Expansionsarbeit nach der Zeunerschen Formel:

$$w^2 = c_i^2 = 2\,g_0\,p_0\,v_0\,\frac{k}{k-1}\left[1-(p/p_0)^{\frac{k-1}{k}}\right], \quad \ldots \quad (1')$$

ich schreibe diese Formel in der für die Zwecke der Kosmonautik besseren Form:

$$c_i^2 = 129^2\,\frac{T_\alpha}{\mu}\,\frac{k_m}{k_m-1}\,(1-T/T_\alpha)\,\text{m/sek [Fußnote}^2)] \quad (1)$$

Den Wert

$$\left[1-(p/p_0)^{\frac{k-1}{k}}\right] = 1 - T/T_\alpha = B \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

nenne ich den Gradienten B für die Erfüllung der Expansion.

Wenn wir diesen Wert $B = 1$ setzen (was praktisch nicht erreichbar ist), so erhalten wir die

totale ideelle Mündungsgeschwindigkeit c_{it} . . (3)

(Wir werden gleich sehen, daß wir diesen Wert nur vorübergehend zur Ableitung einer Formel benötigen.)

Nun sehen wir uns den ersten Ausdruck nochmals genauer an, und wir erhalten durch eine kleine Umformung aus:

$$c_i^2 = 129^2\,\frac{T_\alpha}{\mu}\,\frac{k}{k-1}\,(1-T/T_\alpha), \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

folgendes:

$$= 129^2\,\frac{1}{\mu}\,\frac{k}{k-1}\,(T_\alpha - T_\omega) \quad \ldots\ldots \quad (4)$$

$$= c_{it_\alpha}{}^2 - c_{it_\omega}{}^2 \ldots\ldots \quad (5)$$

[1]) Fortsetzung aus der Artikelserie „Fahrtrouten" von Ing. G. v. Pirquet in der Zeitschrift „Die Rakete", Offizielles Organ des Vereins für Raumschiffahrt e. V. in Deutschland. Breslau, 15. November 1928.

[2]) Aus $p_0 v_0 = R \cdot T = \frac{848}{\mu}T$, $129^2 = 2 g_0 \cdot 848$ und $(p/p_0)^{\frac{k-1}{k}} = T/T_\alpha$

Das Quadrat der ideellen Geschwindigkeit ist also nichts anderes als die Differenz der Quadrate der totalen ideellen Mündungsgeschwindigkeiten für die Anfangs- und für die Mündungstemperatur.

Es ist aber ferner klar, daß $c_{\ddot{u}_a}$ nichts anderes ist

Nehmen wir ferner für eine gute Düse eine Verlustziffer von 20% Energieverlust an, so erhalten wir

$$c = 0{,}8 \cdot 7{,}55 = 6{,}74 \text{ km/sek [Fußnote}^3)].$$

2. Für Knallgas, das mit Wasserstoff übersättigt ist, erhalten wir näherungsweise folgende Werte:

$2\,H_2O +$	Cal/kg	Kalorien bis 2770°	Kalorien für Isotherme	μ	T_ω	$\frac{1}{2}\,En_c$	$\frac{T_\omega}{\mu}$	k_m	$\frac{T_\omega}{\mu}\,\frac{k}{k-1}$	c_i km/sek
$+\,3\,H_2$	3280	2740	540	8,42	1280°	1652	152	1,333	608	4,17
$+\,4\,H_2$	3100	3055	45	7,35	1040°	1561	142	1,345	552	4,10
$+\,5\,H_2$	2970			6,59	880°	1496 + 7,3‰	133,5	1,355	510	4,05

als die hypothetische Geschwindigkeit c_h, welche uns die gesamte Wärmeenergie des Verbrennungsgemisches bei verlustloser und totaler Expansion ergeben sollte.

Wir können nun einfach folgendes setzen:

$$c_h^2 = 2\,g_0 \cdot 427\,En_c = c_{\ddot{u}_a}^2 \quad \ldots\ldots \quad (6)$$

und erhalten somit durch weitere Umformung:

$$c_i^2 = c_h^2 - c_{\ddot{u}_\omega}^2,$$

$$= 129^2\left(\frac{1}{2}\,En_c - \frac{T_\omega}{\mu}\,\frac{k}{k-1}\right)^{1)} \quad \ldots\ldots \quad (7)$$

Dieser Ausdruck ist aber sehr bequem und sehr exakt, und daher sehr wertvoll.

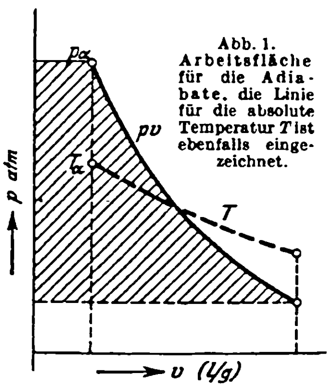

Abb. 1. Arbeitsfläche für die Adiabate, die Linie für die absolute Temperatur T ist ebenfalls eingezeichnet.

Exakt ist er deshalb, weil er außer lauter theoretisch gegebenen Werten (En_c, k_m, μ) nur den Wert T_ω enthält, und diese Mündungstemperatur aber leicht praktisch gemessen oder graphisch ermittelt werden kann[2]).

Ein paar praktische Beispiele sollen uns dessen Verwendbarkeit vorführen.

1. Das Ideal der Kosmonauten wäre, wenn der atomale Wasserstoff praktisch verwendbar wäre.

Angenommen, ich versetze gewöhnlichen molekularen Wasserstoff mit soviel atomalem Wasserstoff, daß ein molekularer Wasserstoff mit 2500° Anfangstemperatur = 2773° absolut resultiert und daß ich mit einer Expansion von $p_a/p_\omega = 100$ rechnen kann.

Ich erhalte dann folgendes: Laut Formel 7:

$$c_i^2 = 129^2\left(\frac{1 \cdot 0073}{2}\,En_c - \frac{T_\omega}{\mu}\,\frac{k_m}{k_m-1}\right), \text{ worin}$$

$En_c = 9500$ Kal (für H_2 bei 2773°),

$T_\omega = 740°$ abs (für H_2 und $T_a = 2773°$ und $p/p_\omega = 100$),

$k_m =$ Mittelwert, abwärts von $740° = 1{,}39$.

Es folgt nunmehr:

$$c_i^2 = 129^2\left(\frac{1{,}0073}{2}\,En_c - \frac{T_\omega}{2}\,\frac{k_m}{k_m-1}\right)$$

$$= 129^2\left(4785 - \frac{740}{2}\,\frac{1{,}39}{0{,}39}\right),$$

$$= 129^2\,(4785 - 1355) = 129^2 \cdot 3430;$$

$$c_i = 129\,\sqrt{3430} = 129 \cdot 58{,}5 = 7{,}55 \text{ km/sek.}$$

Hier wurde wieder für die Expansion $p/p_a = 100$ angenommen; ferner als Maximaltemperatur 2773° abs; dabei muß bei den geringeren Verdünnungsgraden (Vd. mit Wasserstoff) angenommen werden, daß der Rest der Verbrennung schon bei Expansion erfolgt, wobei also noch in Zeile 1 540, in Zeile 2 45 Kalorien zur Auffüllung der Expansionskurve auf eine Isotherme in Verwendung treten. Dadurch wird hier eben auch die Mündungstemperatur bedeutend höher liegen.

Die Werte von c_i liegen knapp über 4 km/sek. Nachdem sich aber für sehr große und richtig profilierte Düsen die Verlustziffer auf zirka 10% reduzieren, und übrigens die nutzbare Expansion von 100 : 1 überschritten werden dürfte, kann man bis zur Realisierung der Kosmonautik schon annehmen, daß der von mir angenommene Wert von $c \sim 4$ km/sek erreicht sein dürfte.

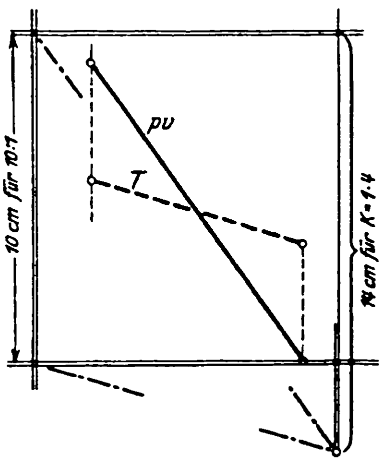

Abb. 2. Arbeitsfläche für die Adiabate auf doppeltem Logarithmenpapier dargestellt. Die Kurven $p\,v$ und $T\,v$ erscheinen als gerade Linien, wobei

$\operatorname{tg} T/v = \frac{\lg T}{\lg v} = -(k-1)$ und

$\operatorname{tg} p/v = \frac{\lg p}{\lg v} = -k$ ist, weil

$p\,v^k =$ konst. u. daher $-\lg p = \lg v$ ist, usw.

Erläuterungen.

Mithin ist die Ableitung und Anwendung dieser wichtigen Formel vorgeführt, und es erübrigt sich nur noch, an das Vorgebrachte einige Erläuterungen anzuschließen. Nachdem Herr Oberbaurat Baetz in seinem diesbezüglichen Artikel im (Märzheft) Heft 3 dieser Zeitschrift, mich dabei mehrfach, und zwar unrichtig zitiert, oder doch mißversteht, soll dies gleichzeitig mit der Widerlegung dieser Einwände geschehen. Ich werde mich also, nach einer Vorbemerkung, an die Numerierung des angezogenen Artikels Seite 50 halten.

Für Reisen zur Außenstation rechne ich mit einem Geschwindigkeitsaufwand $v_i \sim 10{,}5$ km/sek. (brutto)[4]). Für die Reisen ab Außenstation wirken die Düsen stets im Vakuum. Für erstere (zur Außen-

[1]) Ganz genau ist nicht $\frac{1}{2}\,En_c$, sondern $\frac{1.0073}{2}\,En_c$ zu setzen.

[2]) Überdies macht der zweite Ausdruck, der T_ω enthält, meist nur zirka ein Drittel des ersten Ausdruckes mit En aus, und außerdem wird, um c_i zu erhalten, aus dem Ganzen noch die Wurzel ausgezogen.

[3]) Aber nie Werte in der Größenordnung von 30 km/sek, wie sie Lademann, Berlin, angibt.

[4]) v_i ist die „ideelle" Geschwindigkeit der Rakete, das ist die Summe aller willkürlich zu erteilenden Geschwindigkeits-Änderungen, welche für eine bestimmte Reise erforderlich ist.

station) macht also jene Zeitspanne, in welcher die Düse in Luft arbeitet, nur 3 bis 5% gegen jene aus, in welcher sie im Vakuum funktioniert.

Es ist also klar, daß wir uns, für Überschlagsbetrachtungen, **nur** mit der Funktion der Düse im Vakuum zu befassen haben.

Zu 1: Es ist nicht richtig, daß bei einer Düse, welche in Luft arbeitet, bloß die **Schallgeschwindigkeit** als Mündungsgeschwindigkeit erreicht werden kann.

Die Schallgeschwindigkeit als Mündungsgeschwindigkeit kommt nur für einfache (zylindrische) Löcher in einer Wand in Betracht und tritt bei Düsen mit divergierender Mündung schon im **Halsquerschnitt** auf.

Da der Halsquerschnitt aber meist (je nach der Größe von $k = c_p/c_v$) mit dem Druck $p \sim 0{\cdot}6\,p_0$ übereinstimmt, so wäre diese Einwendung nur dann in Gültigkeit, wenn p_0 nicht größer als $1 \cdot 8\,p$ wäre, was für uns **nie** in Betracht kommt. (Schon für die ersten Sekunden gilt für $p_0 = 10$ at, also: $p_0 : p = 10 \cdot 1$ oder für $p_0 = 20$ at, $p_0 : p = 20 : 1$, und für $p = 0{,}1$ at (für 16 km Höhe) also schon $p_0 : p = (100$ bis $200) : 1$.

In dieser Höhe hat aber die Rakete selbst bereits längst die Schallgeschwindigkeit der atmosphärischen Luft überschritten, und die Düse arbeitet also effektiv im Vakuum.

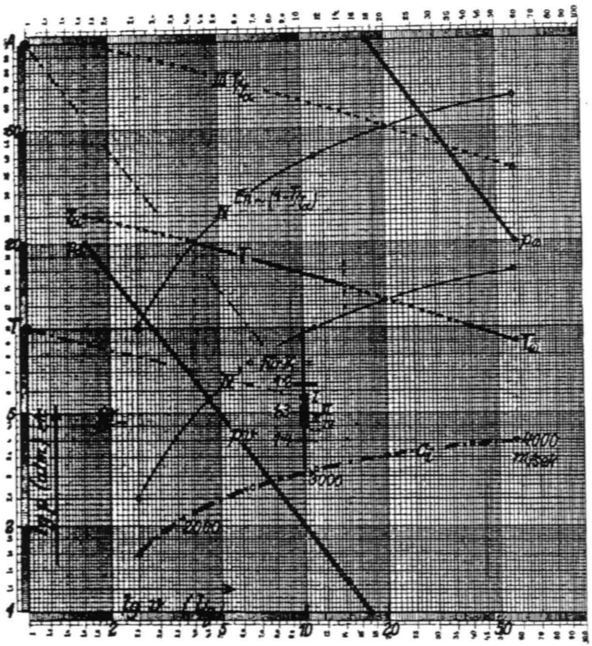

Abb. 3. Adiabate und Mündungsgeschwindigkeit auf doppeltem Logarithmenpapier für $7\,H_2 + O_2 = 2\,H_2O + 5\,H_2$. Außer den Kurven für p/v und T/v sind auch die

Kurve III für T/T_α und
„ IV „ $(1 - T/T_\alpha) = En$

eingetragen. Die Kurve IV ist die Energiekurve.

Die Adiabate in Kurve I wurde // zu $A\,I$ durch p_α, die Temperaturlinie in Kurve II wurde // zu $T\,I$ durch T_α gezogen, dann, ab 2000°, // $A\,II$ und $T\,II$ usw. Wird die Kurve IV mit dem Absolutwert $En_c = 2970$ Cal/kg (vgl. Haupttext) multipliziert, wobei also

$$En_c \cdot ae \cdot 2\,g_0 = 2970 \cdot 427 \cdot 19 \cdot 62 = 24\,880\,000,$$

so erhält man die Kurve IV′; die Wurzel aus dieser Kurve IV′ ergibt direkt die gesuchten Werte Kurve V: die **idellen Geschwindigkeiten** c_i für die einzelnen Phasen der Expansion.

Dabei wurde k nicht konstant genommen, sondern für die Intervalle
2500°—2000° $k = 1{,}25$ (Punkt I)
2000—1400° $k = 1{,}285$ (Punkt II)
1400—1000° $k = 1{,}32$ (Punkt III).

Zu Punkt 2: Nun handelt es sich um die Ermittlung der Mündungsgeschwindigkeit der Rakete, wenn dieselbe im Vakuum funktioniert.

Für den divergenten Teil vor der Düsenmündung ist absolut nicht einzusehen, warum die Benutzung der Zeunerschen Formel nicht zulässig sein sollte.

1. Ist es klar, daß die expandierenden Gasmolekel auf den **vor** ihnen (der Mündung zu) liegenden Querschnitt **ebenso** arbeiten, wie auf einen zurückweichenden Kolben. (Darum ist ein Abgehen vom Gesetz $p \cdot v^k =$ konst vollständig unmotiviert, und die Anwendung eines solchen mit $p \cdot v^{2k-1} =$ konst muß als unerklärlich und willkürlich bezeichnet werden, um so mehr als folgendes vorliegt:

2. Sogar für den **Mündungsquerschnitt** unseres divergenten Gasstrahles selbst ist eine Abweichung vom Grundgesetz $p \cdot v^k =$ konst weder motiviert noch zulässig, da hier die Gase mit ihren Geschwindigkeiten von mehreren Kilometern pro Sekunde große **Beharrungskräfte** aufweisen, so daß sie in das Vakuum ebenso austreten, wie wenn die konische Wandung noch weiter verlängert wäre.

3. Daß ich mit der Erfassung der Expansion nicht weiter gegangen bin, als für $p_0 : p = 100 : 1$ anzunehmen, hat seinen Grund darin, weil ich sonst für das Verhältnis: Mündungsdurchmesser zu Halsdurchmesser einen konstruktiv ungünstig großen Wert annehmen müßte.

Aus allem hier Gesagten geht also hervor, daß gegen die Verwendung der von mir aus der Zeunerschen Formel usw. abgeleiteten Hauptformel 7

$$c_i^2 = 129^2\left(\frac{1}{2}En_c - \frac{T\omega}{\mu}\,\frac{k}{k-1}\right)$$

(m/sek).

keine stichhaltige Einwendung vorliegt.

Eine weitere Beeinflussung der Ausströmungsgeschwindigkeit (Mündungsgeschwindigkeit) c der ins Vakuum sekundlich abströmenden Gase $m' = \frac{\Delta m}{\Delta t}$ durch anderwärtige Momente ist **nicht** gegeben.

Diese Mündungsgeschwindigkeit c wirkt nach dem Impulssatz mit einer beschleunigenden Kraft auf die Rakete (m). Diese Kraft $p = c \cdot m'$ und diese Beschleunigung $\gamma = c\,\frac{m'}{m}$ treten (nach der Durchquerung der Atmosphäre) **nur** mehr mit der Schwerewirkung der Erde oder derjenigen eines anderen Schwerefeldes in Kombination, sie sind aber von dem jeweiligen Wert der **Geschwindigkeit** v der Rakete m **ganz unabhängig**.

Es ist daher mit allen Gesetzen der Mechanik vollkommen unvereinbar, und daher auch ganz **unhaltbar**, in der Art, wie es Herr Oberbaurat Baetz in seinen Punkten 3 bis 8 annimmt und vorbringt, eine **Rückwirkung** dieser jeweiligen Raketengeschwindigkeit v auf den Wert der Mündungsgeschwindigkeit c unserer Auspuffgase m' anzunehmen.

Zu 3: Wie aus dem Abdruck meines Artikels in der „Rakete“, Seite 169, hervorgeht, habe ich $c_i = 7{,}5$ km/sek **nicht** für **Knallgas**, sondern für **atomalen Wasserstoff** angegeben, und es erübrigt sich daher auch die Widerlegung der daraus gezogenen Weiterungen.