

ZUR THERMODYNAMIK DER RAKETENBRENNKAMMER: UNGLEICHE GEMISCHVERTEILUNG IM BRENNRAUM

O. LUTZ
Braunschweig

(Received 5 September 1961)

Zusammenfassung—Für ungleiche Gemischverteilung in einem Brennraum, die zum Zwecke der Filmkühlung willkürlich herbeigeführt wird, werden die Verluste gegenüber einer gleichförmigen Gemischverteilung mit Hilfe der auf Vorschlag des Verfassers von Reichert entwickelten i^* , T -Tafeln [1] bestimmt. Einige Beispiele lassen für konstanten Brennraumdruck die Verluste an Austrittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Druck im Düsenendquerschnitt und von der Zusammensetzung der Teilgemische erkennen.

FORMELZEICHEN

- g , Gewichtsanteile der Gemischkomponenten (kg/kg);
 i^* , Reaktionsenthalpie (kcal/kg);
 n , Atomdruck (kp/cm²);
 M , Molekulargewicht (kg/kmol);
 s , Entropie (kcal/kg grd);
 Γ , Reaktionsverhältnis.

Indices

- C, Kohlenstoff;
H, Wasserstoff;
O, Sauerstoff;
0, mittlerer Zustand;
1, 2, Teilgemische.

1. EINLEITUNG

RAKETENBRENNKAMMERN werden heute entweder durch den Brennstoffträger gekühlt, indem ein Brennstoff-Film an der Brennkammerwand gebildet wird, dessen Verdampfungswärme die Wände schützt (Filmkühlung), oder es wird zum gleichen Zweck der Sauerstoffträger herangezogen.

In beiden Fällen kann sich keine gleichmässige Mischung über den Querschnitt der Brennkammer bilden; die Konzentrationen von Brennstoffträger und Sauerstoffträger müssen variieren in Abhängigkeit des Ortes zwischen Brennkammermitte und Brennkammerwand.

Es erscheint schwierig, wenn nicht unmöglich, die entstehenden Zustände und Mischungsverluste mit elektronischen Hilfsmitteln zu

berechnen. Dagegen lassen sich mit vorhandenen graphischen Darstellungen auch diese umständlich zu überschauenden Vorgänge exakt und übersichtlich behandeln.

2. VORGEHEN

Aus den i^* , T -Tafeln, welche Reichert [1] nach einem Vorschlag des Verfassers aufgestellt hat, und welche in den letzten Jahren vervollständigt wurden [2], lassen sich für einen gegebenen Kohlenwasserstoff sowohl die Reaktionsenthalpien [3] als auch die Entropien in Abhängigkeit vom Sauerstoffverhältnis entnehmen, die zur Bestimmung der Zustände der Reaktionsgemische während der Entspannung benötigt werden. Nachstehend ist von dem n_C/n_H -Verhältnis 0,4 ausgegangen, welches etwa Butan entspricht; hierfür sind Tafeln unmittelbar vorhanden. Weitere Tafeln sind für $n_C/n_H = 0; 0,2; 0,6$ und $0,8$ fertiggestellt, so dass die Berechnungen auch für jedes andere vorgegebene n_C/n_H -Verhältnis durch Interpolation zwischen mehreren Tafeln durchgeführt werden können.

3. VERLUSTE BEI UNGLEICHER GEMISCHVERTEILUNG

Es sollen für eine Raketenkammer die sich bei einer ungleichen Gemischverteilung ergebenden Verluste bestimmt werden, die durch den sich gegenüber vollkommener Mischung ergebenden Entropieverlust bzw. durch die

Enthalpiedifferenzen oder Unterschiede in den Austrittsgeschwindigkeiten dargestellt werden.

Für die in der Brennkammer ablaufende Reaktion wird zunächst ein Reaktionsverhältnis vorgegeben, das sich bei vollkommener Mischung der Reaktionsteilnehmer einstellt. Unter Reaktionsverhältnis ist der Ausdruck

$$\Gamma_0 = \frac{n_O}{2n_C + \frac{1}{2}n_H + n_O} \quad (1)$$

zu verstehen, bei dem n_O , n_C und n_H die Atomdrücke der Elemente Sauerstoff O, Kohlenstoff C und Wasserstoff H bedeuten.

Bei vorgegebenem Verhältnis n_C/n_H , z.B. $n_C/n_H = 0,4$ entsprechend etwa Butan C_4H_{10} , ergibt sich aus Gl. (1) unmittelbar

$$\frac{n_O}{n_H} = \frac{1,3 \Gamma_0}{1 - \Gamma_0} \quad (2)$$

und somit für ein gegebenes mittleres Reaktionsverhältnis Γ_0 ein fester Wert.

Mit den Molekulargewichten lassen sich aus den Atomdrücken die Gewichtsanteile g_C , g_O , g_H bestimmen, deren Summe

$$g_C + g_H + g_O = 1$$

betragen muss.

Mit den vorgegebenen bzw. nach Gl. (2) bestimmten Verhältnissen n_C/n_H und n_O/n_H ergeben sich auch die Verhältnisse

$$\frac{g_C}{g_H} \text{ bzw. } \frac{g_O}{g_H}$$

Als einfachste Möglichkeit einer ungleichen Gemischverteilung sei vorgegeben, dass nur zwei Mischanteile vorliegen, die gewichtsmässig gleich sind, und dass das Verhältnis $(n_C/n_H)_{1,2}$ für beide Anteile konstant bleibt. Diese Bedingungen führen zu den Bestimmungsgleichungen

$$g_{C,1} + g_{C,2} = 2g_C \quad (3)$$

$$g_{H,1} + g_{H,2} = 2g_H \quad (3a)$$

$$g_{O,1} + g_{O,2} = 2g_O \quad (3b)$$

sowie

$$g_{C,1}/g_{H,1} = g_{C,2}/g_{H,2} = 0,4 \frac{M_C}{M_H} \quad (4)$$

und

$$g_{C,1} + g_{H,1} + g_{O,1} = 1, \quad (5)$$

$$g_{C,2} + g_{H,2} + g_{O,2} = 1. \quad (5a)$$

Aus diesen Bestimmungsgleichungen und der aus Gl. (1) abzuleitenden Beziehung

$$\Gamma_{1,2} = \frac{g_{O_{1,2}}/M_O}{2g_{C_{1,2}}/M_C + 0,5 g_{H_{1,2}}/M_H + g_{O_{1,2}}/M_O} \quad (1a)$$

mit M_O , M_C und M_H als den Molekulargewichten von Sauerstoff, Kohlenstoff und Wasserstoff lassen sich die Gewichtsanteile $g_{H,1}$ und $g_{H,2}$ in Abhängigkeit von $\Gamma_{1,2}$ bestimmen:

$$g_{H,1} = \frac{1 - \Gamma_1}{\alpha \Gamma_1 + \beta} \quad (6a)$$

und

$$g_{H,2} = \frac{1 - \Gamma_2}{\alpha \Gamma_2 + \beta} \quad (6b)$$

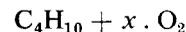
Aus (6a) und (6b) erhält man in Verbindung mit (3a) die Beziehung

$$\Gamma_2 = \frac{\varphi \Gamma_1 + \psi}{\chi \Gamma_1 - \varphi} \quad (7)$$

deren Faktoren φ , ψ und χ sich aus den gegebenen Anfangsgrößen n_C/n_H , Γ_0 und den Molekulargewichten bestimmen lassen. Γ_1 und Γ_2 sind dann die Reaktionsverhältnisse zweier gewichtsmässig gleicher Mischanteile, deren eines ein Gemisch mit Brennstoffüberschuss und deren anderes ein Gemisch mit Sauerstoffüberschuss darstellt.

Zur Feststellung der Verluste, die durch diese ungleiche Gemischverteilung im Brennraum auftreten, bedient man sich der i^* , Γ -Tafeln, aus denen die Reaktionsenthalpien und die Entropien zu entnehmen sind.

Ausgehend von der Reaktionsgleichung



werden mit Hilfe der Gl. (1) für $n_C = 4$, $n_H = 10$ und für $x = n_O/2$ die Reaktionsenthalpien i^* für aus Gl. (7) gewonnene Wertepaare für $\Gamma_{1,2}$

bestimmt und in die i^* , Γ -Tafel für beispielsweise 100 kp/cm² eingetragen [2] (Abb. 1). Bei der Durchrechnung der Beispiele wurde die Ausgangstemperatur von Butan mit 298,16°K, die

Man stellt sogleich fest, dass die Entropieverluste mit zunehmendem Abstand der Reaktionsverhältnisse der Teilgemische vom mittleren Reaktionsverhältnis grösser werden.

Interessanter ist jedoch der sich in der Verringerung der Enthalpiedifferenz bzw. Auströmgeschwindigkeit ausdrückende Verlust, der in einfacher Weise dadurch bestimmt wird, dass für konstante Entropien und konstante Teilreaktionsverhältnisse die Reaktionsenthalpien bei Entspannungen auf 10; 1,0; 0,1; 0,01 und 0 kp/cm² aus den entsprechenden i^* , Γ -Tafeln bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 zusammengestellt, in der über den Teilreaktionsverhältnissen, ausgehend vom mittleren Reaktionsverhältnis 0,5 bis zu reinem O₂ ($\Gamma_1 = 1$) die sich ergebenden Austrittsgeschwindigkeiten aufgetragen sind.

Das durch den Druck im Düsenendquerschnitt bestimmte Entspannungsverhältnis ist in kp/cm² an jede Kurve angeschrieben. Der Druck in der Brennkammer beträgt in jedem Falle 100 kp/cm². In Abb. 2 sind für jeden Druck zwei Kurven eingetragen, von denen die durchgezogene Linie für den Fall gilt, dass die ungleiche Gemischverteilung bis zum Düsenendquerschnitt beibehalten wird. Die gestrichelte Linie gilt dann, wenn während der Entspannung eine langsame Vermischung der Teilgemische erfolgt, die im Endquerschnitt der Düse vollendet ist. Der tatsächliche Zustand liegt zwischen beiden Grenzfällen.

Man erkennt deutlich, dass bei grösseren Entspannungsverhältnissen die erzielbare Austrittsgeschwindigkeit bei zunehmender Abweichung vom mittleren Mischungsverhältnis

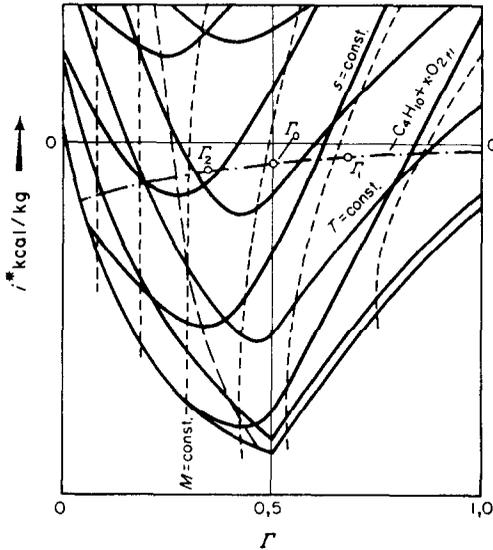


ABB. 1. Schematische Darstellung der i^* , Γ -Tafel mit Enthalpielinie für das Reaktionsgemisch $C_4H_{10} + x \cdot O_{211}$.

von Flüssigsauerstoff mit 90°K angenommen. Für ein gewähltes mittleres $\Gamma_0 = 0,5$, das bei einer Entspannung ins Vakuum den grössten spezifischen Impuls ergibt, erhält man die in Tafel 1 zusammengestellten Reaktionsenthalpie- und Entropiewerte:

Tafel 1

Γ_1	—	0,5	0,45	0,4	0,359	0,3	0,274
i^*_1	(kcal/kg)	-187	-201	-219	-233	-261	-273
s_1	(kcal/kg grd)	2,60	2,727	2,860	2,966	3,078	3,103
Γ_2	—	0,5	0,551	0,622	0,7	0,855	0,95
i^*_2	(kcal/kg)	-187	-173	-157	-141	-115	-103
s_2	(kcal/kg grd)	2,60	2,474	2,31	2,133	1,775	1,40
s_{mittel}		2,60	2,60	2,585	2,55	2,43	2,20

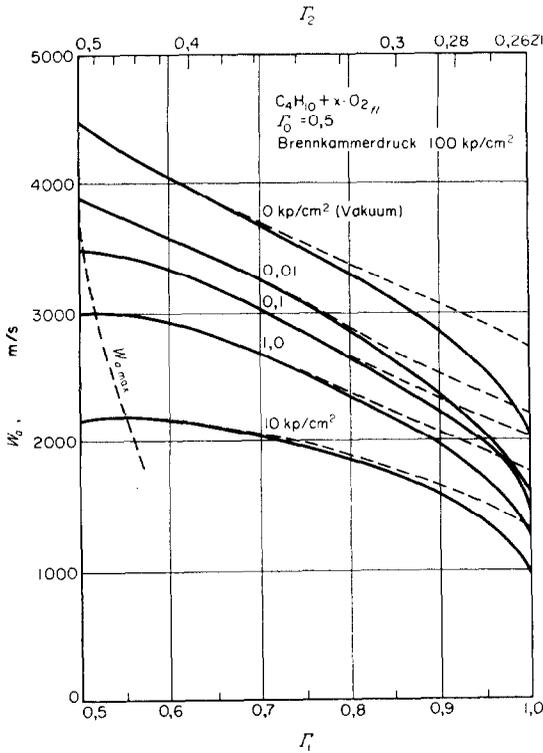


ABB. 3. Theoretische Austrittsgeschwindigkeiten bei Entspannung von 100 kp/cm² auf 10; 1; 0,1; 0,01; 0 kp/cm² und ungleicher Gemischverteilung im Brennraum. Mittleres Reaktionsverhältnis $\Gamma_0 = 0,468$.

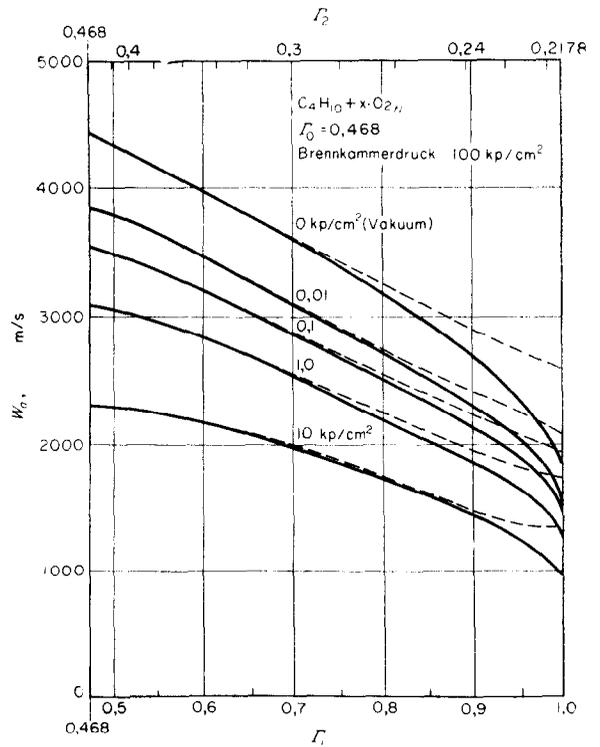


ABB. 2. Theoretische Austrittsgeschwindigkeiten bei Entspannung von 100 kp/cm² auf 10; 1; 0,1; 0,01; 0 kp/cm² und ungleicher Gemischverteilung im Brennraum. Mittleres Reaktionsverhältnis $\Gamma_0 = 0,5$.

stark abnimmt, so dass die Kühlung der Brennkammer- und Düsenwandung mit Brennstoff oder Sauerstoffträger bei grösseren Entspannungsverhältnissen mit erheblichen Verlusten an spezifische Impuls erkaufte werden muss. Bei geringeren Entspannungsverhältnissen treten diese Erscheinungen nicht so stark in den Vordergrund, vielmehr lässt sich z.B. an der Geschwindigkeitslinie für die Entspannung von 100 auf 10 kp/cm² erkennen, dass noch bei Teilreaktionsverhältnissen von etwa 0,6 und 0,42 die gleiche Austrittsgeschwindigkeit erzielt wird wie bei 0,5. Bei 0,45 und 0,55 als Teilreaktionsverhältnissen ist sogar ein ausgeprägtes Maximum festzustellen, so dass in diesem Fall durch ungleiche Gemischverteilung Vorteile zu erzielen sind.

In Abb. 2 ist gestrichelt noch die Linie der maximalen Austrittsgeschwindigkeiten angedeutet, die sich mit zunehmendem Entspannungsverhältnis dem Reaktionsverhältnis $\Gamma_0 = 0,5$ für stöchiometrische Verbrennung nähert.

Das oben Gesagte gilt natürlich nur für ein mittleres Reaktionsverhältnis von $\Gamma_0 = 0,5$, das bei sehr grossen Entspannungsverhältnissen die maximale Austrittsgeschwindigkeit liefert. Betrachtet man dagegen den Fall, bei dem für eine Entspannung auf etwa 0,1 kp/cm² das grösste Enthalpiegefälle erzielt und bei dem gleichzeitig die höchste Verbrennungstemperatur erreicht wird, so ergeben sich die im Abb. 3 dargestellten Verhältnisse. Hier sind für ein mittleres Reaktionsverhältnis $\Gamma_0 = 0,468$ wieder die Austrittsgeschwindigkeiten bei Entspannung auf die Drücke 10; 1; 0,1; 0,01 und 0 kp/cm² über den Teilreaktionsverhältnissen $\Gamma_{1,2}$ aufgetragen. Der Verlauf der Kurven ist ähnlich wie in Abb. 1, jedoch liegen hier die maximalen Austrittsgeschwindigkeiten stets bei Γ_0 .

ERGEBNISSE

Es werden für den Fall ungleicher Gemischverteilung in einem Brennraum, die zum Zwecke der Filmkühlung willkürlich herbeigeführt wird, die Verluste gegenüber einer gleichförmigen Gemischverteilung bestimmt. Dabei werden die i^* , Γ -Tafeln, die auf Vorschlag des Verfassers von Reichert entwickelt wurden, zur Bestimmung der Enthalpiedifferenzen und Entropien verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorteile der Filmkühlung, sei es mit Brennstoff oder Sauerstoffträger, auf jeden Fall mit beträchtlichen Verlusten an spezifischem Impuls erkaufte werden müssen; es ergibt sich aber weiterhin, dass bei einem mittleren Reaktionsverhältnis im Brennraum, das stöchiometrischer Verbrennung entspricht, durch geringe ungleiche Gemischverteilung bessere spezifische Impulse bzw. höhere Ausströmgeschwindigkeiten erzielt werden als bei gleichförmiger Gemischverteilung, wenn geringe Entspannungsverhältnisse angewendet werden. Bei Wahl eines für höhere Entspannungsverhältnisse optimalen Reaktionsverhältnisses, das im unterstöchiometrischen Bereich liegt, treten diese Vorteile nicht mehr auf. Hier ergibt ungleiche Gemischverteilung in jedem Fall einen Verlust an spezifischem Impuls.

LITERATUR

1. H. REICHERT, Enthalpy charts for dissociating gas mixtures in the temperature range 600°K to 4000°K, *MOS A.R.C. Techn. Rep. R.M. No. 3015* (1957).
2. O. LUTZ und W. MÜLLER, Enthalpie-Tafeln für dissoziierende Reaktionsgemische im Temperaturbereich 600°K bis 6000°K (*DFL-Bericht Nr. 122*).
3. O. LUTZ, Technische Reaktionsthermodynamik, *Z. Flugwiss.* 3, Nr. 6, 151–59 (1955).

Abstract—For unequal distribution of the mixture in a combustion chamber, which is produced intentionally for the purpose of film-cooling, the losses compared with uniform distribution are determined by means of the i^* , Γ -charts [1], which have been constructed by Reichert on proposal of the author. Some examples for constant combustion chamber pressure show the losses in exhaust velocity in dependence of the nozzle exit pressure and the composition of the different mixtures.

Résumé—Pour une distribution non-uniforme du mélange dans une chambre de combustion (créée intentionnellement dans le but d'obtenir un refroidissement par film), l'auteur détermine les pertes, par rapport au cas d'une distribution uniforme, à l'aide des diagrammes i^* , Γ construits, sur sa demande, par Reichert. Quelques exemples, dans le cas d'une pression constante dans la chambre de combustion, montrent les pertes de vitesse à la sortie en fonction de la pression à la sortie de la tuyère et de la composition des différents mélanges.

Аннотация—С помощью диаграмм t^* и $T[U]$, построенных Райхертом, определены потери для случая распределения смеси в камере сгорания, специально создаваемого для целей плёночного охлаждения. Эти потери были сравнены со случаем равномерного распределения смеси. Несколько примеров для случая постоянного давления в камере сгорания показывают, что потери скорости зависят от давления в выходном срезе сопла и состава различных смесей.