

Vergleichsbetrachtungen und Treibstofffragen bei R-Antrieben

Von Otto Lutz

1. Einleitung

Die Entwicklung der R-Antriebe hat in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte gemacht. Herr Hedwig hat in seinen Ausführungen einen Einblick gegeben, welche vielfältige Anwendungsgebiete in Angriff genommen oder bereits erschlossen sind. Daß dabei schon technische Erfolge überraschenden Ausmaßes erzielt worden sind, ist zunächst ein Verdienst der entwickelnden Stellen der Industrie. Für die Lösung von Einzelfragen ist aber in mehr oder minder großem Ausmaß die Forschung herangezogen worden, und außerdem war die Forschung von sich aus in der Lage, einige fruchtbare Gedanken auf diesem Gebiet beizusteuern.

Wenn die an verschiedenen Stellen laufende technische Entwicklung zu gewissen abschließenden Ergebnissen gelangt ist, so ist der Zeitpunkt gekommen, die Ergebnisse technisch zu vergleichen. Hierzu dienen Kennwerte, die ein Maß für den Erfolg der technischen Anstrengung und für einen Vergleich untereinander darstellen sollen. Auf dem noch jungen R-Gebiet haben sich bislang noch keine allgemeinen Kennwerte durchsetzen können. Im ersten Teil meiner Ausführungen wird der Versuch gemacht, einige Kennwerte zu bilden. Im zweiten Teil soll über einige Gedanken berichtet werden, die wir auf dem Treibstoffgebiet für R-Antriebe bereits seit 1935 verfolgen und die in den vergangenen Jahren erfolgreiche Auswirkungen hatten.

2. Kennwerte

a) Brennraumgestaltung

Es ist bekannt, daß man bei Kraftmaschinen Kennwerte in einfacher Form aus der Ähnlichkeitsmechanik ableiten kann. Man braucht bei Kolbenmaschinen nur von der Grundforderung auszugehen, daß die Arbeitsverfahren vorgegeben sind, also die Gasdrücke an den einzelnen Stellen des Arbeitsdiagrammes für verschiedene Maschinen vergleichbar sind, um sofort mit dem Newtonschen Ähnlichkeitsgesetz zusammen ab-

leiten zu können, daß damit auch alle Geschwindigkeiten vergleichsfähige Größen sind. Nicht vergleichsfähig sind dagegen Beschleunigungen oder Literleistungen, so daß insbesondere bei der Benutzung dieser Werte Vorsicht geboten ist.

Bei den im Aufbau sehr viel einfacheren R.-Antrieben sind die Ähnlichkeitszusammenhänge verwickelter. Beschränkt man sich auf den Reaktionsraum — der in den weiteren Betrachtungen Brennraum genannt werden soll —, so scheint zunächst, daß etwa der geometrische Vergleich des Verhältnisses Brennraumdurchmesser zu Brennraumlänge eine Ähnlichkeitsgerechte Größe darstellt, wie dies bei Brennräumen von Kolbenkraftmaschinen der Fall ist, die bei großen und kleinen Maschinen geometrisch ähnlich sind. Nun stellt die Brennraumlänge — vgl. Abbildung 1 — ein Maß für die Verweilzeit des Arbeitsmittels, also für die

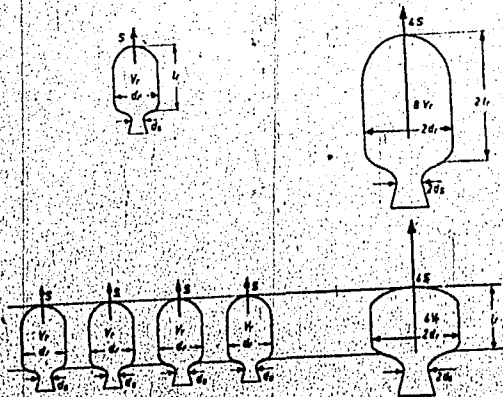


Abb. 1
Zur Ähnlichkeit von Brennräumen

zur Reaktion des Sauerstoffträgers mit dem Brennstoffträger zur Verfügung stehenden Zeit dar. Für gleiche Treibstoffe müßte die Verweilzeit in erster Näherung konstant sein, also auch die Brennraumlänge gleich bleiben.

Größere Brennräume wären also durch Parallelschalten von kleineren zu gewinnen, d. h. die Brennräume müßten nur im Durchmesser, nicht in der Länge wachsen. Daß hier rein formenmäßig Grenzen gezogen sind,

ist verständlich: ausgeführte Brennräume zeigen ein leichtes Anwachsen der Länge bei größerem Durchmesser. Es ist also kaum möglich, große und kleine Brennräume thermisch ähnlich zu gestalten.

Für den Reaktionsablauf ist der Brennraumdruck in seiner absoluten Größe nicht so einschränkend festgelegt wie etwa bei einem Dieselmotor. Es ist bekannt, daß der Brennraumdruck bzw. das Verhältnis Brennraumdruck zum Außendruck von einer bestimmten Größe ab den Wirkungsgrad der Schuberzeugung nicht mehr stark beeinflusst. In Abbildung 2 ist der Schubverbrauch über dem Entspannungsverhältnis auf-

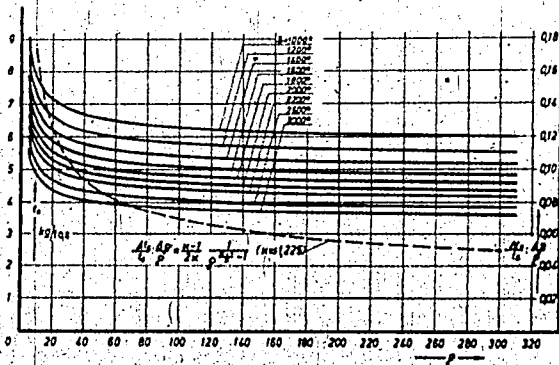


Abb. 2
Schubverbrauch t_s + Entspannungsverhältnis p

getragen, wobei verlustlose Entspannung in einer erweiterten Düse angenommen ist. In die Abbildung sind noch die verhältnismäßigen Verbesserungen

$$\frac{\Delta t_s}{t_s} \cdot \frac{\Delta p}{p}$$

bei Änderung des Entspannungsverhältnisses eingetragen, für die man ableitet

$$\frac{\Delta t_s}{t_s} \cdot \frac{\Delta p}{p} = \frac{k-1}{2k} \cdot \frac{1}{p^k - 1}$$

Man erkennt, daß von einem Entspannungsverhältnis von 35 : 1 ab die verhältnismäßigen Wirkungsgradverbesserungen weniger als ein Zehntel der verhältnismäßigen Druckerhöhungen werden.

Dagegen ist der Brennraumdruck von wesentlichen Einfluß auf die Größe des erzeugten Schubes. Für diesen leitet man ab (wieder für verlustlose Entspannung in erweiterter Düse):

$$S = \frac{2\kappa}{\kappa^2 - 1} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \mu f p_r \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_r} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Aus Abbildung 3 geht hervor, daß der Schub ungefähr linear mit dem Brennraumdruck anwächst.

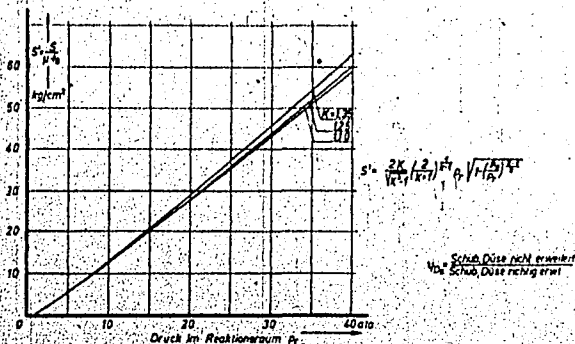


Abb. 3

Einfluß des Druckes im Reaktionsraum auf den Schub

Aus den beiden Überlegungen ergibt sich, daß die Wahl des Brennraumdruckes weniger von den inneren Vorgängen abhängen wird, als vielmehr von anderen Erwägungen, wie etwa Bemessung der Treibstoffförderanlage, Brennraumgewicht u. a. m. Aus diesem Grunde ist es auch schwer, einigermaßen richtig begründete Vergleichszahlen anzugeben.

Bildet man das Verhältnis des in der Zeiteinheit durchgesetzten Treibstoffvolumens zum Brennraumvolumen, so ergibt sich ein Kennwert von der Dimension 1/sec. Nach den Überlegungen zur Verweilzeit müßte ein solcher Kennwert vergleichsfähig sein. In Abbildung 4 ist dieser Kennwert — den man spezifischen Durchsatz nennen könnte — für verschiedene Brennräume eingzeichnet¹⁾; an Stelle des Durchsatzvolumens

¹⁾ Einige Daten verdanke ich dem freundlichen Entgegenkommen der Firmen BMW und HWK.

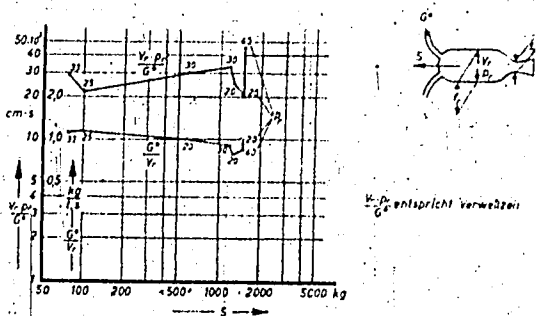


Abb. 4

Kennwerte des Brennraumes von R-Geräten

ist das Durchsatzgewicht G^* eingesetzt, da die Unterschiede der Treibstoffwichten nicht groß sind. Obwohl die Brennraumgrößen sehr verschieden sind — die Schübe verhalten sich wie 1 : 30 —, weisen die Kennwerte nur geringe Unterschiede auf und gruppieren sich um den leicht einprägsamen Wert 1 kg/l s.

Man könnte vermuten, daß der Brennraumdruck auf den spezifischen Durchsatz von Einfluß sein muß; es sind deshalb in die Abbildung die jeweiligen Brennraumdrücke aufgenommen. Eine einheitliche Tendenz ist nicht festzustellen. Besonders deutlich wird dies aus der Aufzeichnung des Ausdruckes $V_p \cdot p_r / G^*$, der, abgesehen von den Verschiedenheiten in Temperatur und Molekulargewicht der Reaktionsgase, ein Maß für die Verweilzeit im Brennraum ist. Die Streuungen sind bedeutend: Geräte mit hohem Brennraumdruck weisen große Verweilzeiten auf; eine geringe Zunahme der Verweilzeiten bei Vergrößerung der Geräte ist ebenfalls erkennbar, eine Folge des Umstandes, daß man die Brennräume eben nicht beliebig »dick« bauen kann, sondern bei Vergrößerung des Durchmessers ebenfalls die Länge, wenn auch nicht in gleichem Maß, zunimmt. Ziemlich klar zeigt die Abbildung, daß ein einheitlicher Entwicklungsgrad noch nicht erreicht ist.

In der Abbildung 5 ist der auf den Brennraum bezogene Schub (S/V_r) aufgezeichnet. Gegenüber dem spezifischen Durchsatz, der sich ja nur um den spezifischen Schubverbrauch unterscheidet, sind die Streuungen etwas größer. Bei Berücksichtigung des Brennraumdruckes kann der Wert $V_p \cdot p_r / S$ als Maß für das Verhältnis des jeweiligen Gasgewichtes im

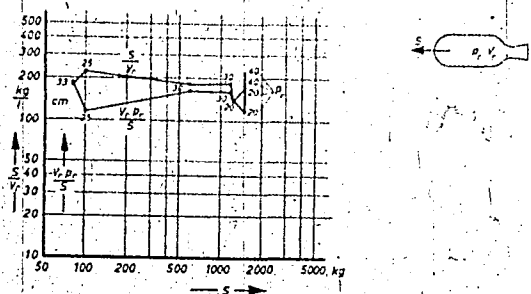


Abb. 5
Kennwerte des Brennraumes von R-Geräten

Brennraum — ungefähr ähnliche Reaktionstemperaturen und Molekulargewichte vorausgesetzt — zum erzeugten Schub angesehen werden. Da nach den einleitenden Bemerkungen über der Schub dem Produkt aus Brennraumdruck und Düsenquerschnitt f_c verhältnisig ist, so stellt der Wert $V_r p_r / S$ auch das Verhältnis V_r / f_c des Brennraumvolumens zum Düsenquerschnitt dar.

In Abbildung 6 werden zwei Verhältniszahlen gezeigt: einmal das Verhältnis $p_{r,r} / p_r$ des auf den Brennraumquerschnitt bezogenen Schubes zum Brennraumdruck. Eine bessere Ausnutzung des Querschnittes bei

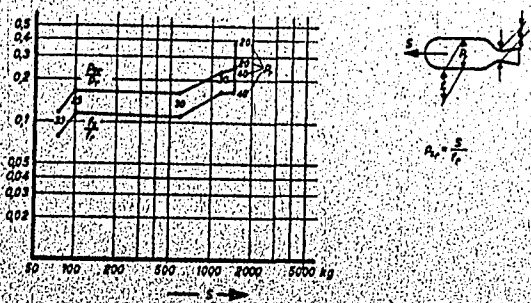
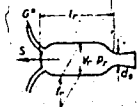
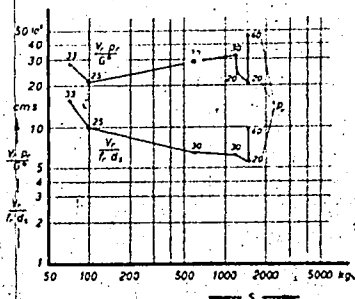


Abb. 6
Kennwerte des Brennraumes von R-Geräten

zunehmender Gerätegröße ist deutlich erkennbar. Dies kann für Geräte, bei denen ein kleiner Spantquerschnitt erwünscht ist, (Anordnung im Heckstromlinienförmiger Körper) gegebenenfalls von Wichtigkeit werden. Das Verhältnis f_r/f_r des Düsenquerschnittes zum Brennraumquerschnitt zeigt entsprechend, daß die Geräte mit zunehmender Größe schlanker werden. Auf die eigentlich geometrische Form des Reaktionsraums bezogen, werden die Geräte jedoch gedrungener, wie die in Abbildung 7 gezeigte Verhältniszahl $V_r/f_r d_s = l_r/d_s$ nachweist. Das rührt



$\frac{V_r}{f_r d_s}$ entspricht $\frac{l_r}{d_s}$

$\frac{V_r p_r}{G^*}$ entspricht Verweilzeit

Abb. 7
Kennwerte des Brennraumes von R-Geräten

davon her, daß die Verweilzeit, wie bereits erwähnt, ein durch den chemischen Prozeß und nicht die Größe des Schubes bedingter Wert ist. Eine Vergrößerung der Geräte kann im wesentlichen daher nur durch »Parallelschaltung« (vgl. Abbildung 1) erreicht werden. Zum Vergleich wurde in die Abbildung nochmals der ein Maß für die Verweilzeit bildende Kennwert $V_r p_r / G^*$ eingetragen.

Man könnte einwenden, daß die bisher vorhandenen Unterlagen noch nicht genügen, um Schlüsse zu rechtfertigen, und daß der Wert solcher vergleichender Betrachtungen überhaupt fraglich ist. Beide Einwände sind berechtigt. Der erste erledigt sich aber von selbst bei weiterer Entwicklung. Der zweite Einwand ist schwerwiegender, denn es wurde ja ausdrücklich darauf hingewiesen, daß bei R-Antrieben die inneren Vorgänge im Reaktionsraum nicht in so engen Grenzen festgelegt sind wie in einem motorischen Brennraum, und deshalb keine festen Ansätze für eine Ähnlichkeitsmechanik vorhanden sind. Trotzdem glaube ich, daß gerade für den Vergleich der laufenden Entwicklungen solche Kennwerte

von Nutzen sein können, wobei aber immer die Einschränkung der fehlenden Basis für eine Ähnlichkeitsgerechte Darstellung vor Augen gehalten werden muß. Deshalb sollen auch die Kennwerte vorläufig ohne weitere Bewertung herausgestellt werden; die Entwicklung der Zukunft wird zeigen, welche von ihnen Daseinsberechtigung haben.

b) Verbrauchszahlen

Zu den konstruktiven Kennwerten tritt als naturgemäß wichtigste Kennzahl die Verbrauchszahl. Der Verbrauchszahl kommt ja deshalb eine überragende Bedeutung zu, weil beim R-Antrieb das Konstruktionsgewicht, bezogen auf die erzielte Leistung, sehr gering, der Verbrauch jedoch, da auch der Sauerstoff mitgeführt wird, außerordentlich hoch ist.

Auch hier zeigt eine nähere Überlegung, daß alle Erfordernisse durch eine einzige Zahl nicht wiedergegeben werden können.

Der einfachste Kennwert ist der spezifische Schubverbrauch, d. h. der Verbrauch an Treibstoff je t Schub und s.

Beim Schubverbrauch sind folgende Fälle zu beachten:

a) Geräte geringsten Verbrauchs

Die Reaktionstemperatur ist nach oben unbegrenzt, deshalb muß ein gewisser konstruktiver Aufwand in Kauf genommen werden. Bei hohen Temperaturen läßt die Dissoziation die Unterschiede zwischen den einzelnen Treibstoffgemischen stark verschwimmen, d. h. die tatsächlich erreichte Reaktionstemperatur weist im Vergleich zum verfügbaren Energiegehalt nur noch geringe Unterschiede auf. Durch die schönen Arbeiten von Wagner, Thiel und Heller liegt jetzt sehr viel Material hierfür vor. Auch das Mischungsverhältnis spielt keine sehr große Rolle, das Optimum wird für Mischungsverhältnisse, die zwischen dem stöchiometrisch zu CO_2 und dem stöchiometrisch zu CO (bei hohen Temperaturen Verschiebung nach der Richtung stöchiometrisch zu CO) liegen, erhalten. Bei gleichen Höchsttemperaturen erreichen Reaktionsgase mit geringem Molekulargewicht höhere Ausströmungsgeschwindigkeiten, also günstigeren Verbrauch.

β) Geräte einfachen konstruktiven Aufbaus mit beschränkter Höchsttemperatur

Hier spielt der Treibstoff insofern eine Rolle, als das Molekulargewicht der Reaktionsgase nunmehr durch die beigefügten Ballaststoffe wirksam beeinflusst werden kann. Da molekularer Wasserstoff aus naheliegenden Gründen nicht mitgeführt werden kann, kommt als Ballaststoff nur Wasser oder durch den Zerfall des Moleküls des überschüssigen Brennstoffes oder eines zusätzlich zugeführten Stoffes

(z. B. Ammoniak) frei gewordener Wasserstoff in Frage; hierüber hat Noeggerath¹⁾ eingehende Untersuchungen angestellt. Die Verwertung starker Brennstoffüberschüsse gibt in weiten Bereichen sehr günstige Ergebnisse, sofern man nicht in das Gebiet allzu großer Rußbildung hineinkommt.

Eine bessere Angleichung der Verbrauchszahlen an die tatsächlichen Verhältnisse erhält man, wenn man berücksichtigt, daß nicht nur das Treibstoffgewicht, sondern auch das Gewicht der Treibstoffbehälter mitzuführen ist. Außerdem muß auf den ganz wesentlichen Einfluß des für die Förderung des Treibstoffes gegebenenfalls notwendigen Fördergases hingewiesen werden. Das Speichergewicht wiederum hängt im wesentlichen von der Dichte des Treibstoffgemisches ab. Doch spielen hierbei auch andere Faktoren eine Rolle (Dampfdruck, Korrosion usw.). Hier wird es schon schwer, ein allgemeines Gesetz abzuleiten, bei genauen Rechnungen wird jedes System für sich durchgerechnet werden müssen. Eine häufig genügende Annäherung erhält man jedoch, falls der Treibstoffverbrauch nicht in kg je to s, sondern in m³ bzw. l je to s angegeben wird.

γ) Geräte für Sonderforderungen

Für spezielle Zwecke ist es jedoch unerläßlich, sämtliche das Ergebnis beeinflussenden Größen zu berücksichtigen. Man wird hierbei für jeden Verwendungszweck zu einer anderen Wertung kommen. Thiel und Heller haben z. B. für den Zweck, größte Schußweiten zu erzielen, Beziehungen abgeleitet, aus denen der überragende Einfluß der Treibstoffdichte (d. h. also der Dichte des Gemisches aus Brennstoffträger, Sauerstoffträger und gegebenenfalls erforderlichem Zusatzstoff) ersichtlich ist.

Berücksichtigt man diese Forderungen, so können an den Treibstoff bezüglich seiner quantitativen Eignung folgende Anforderungen gestellt werden:

- die Dichte des Treibstoffes muß groß sein,
- das Molekulargewicht des Reaktionsgases klein,
- der Dampfdruck des Treibstoffes so gering, daß er keinen zusätzlichen Bauaufwand bedingt.

Diese drei Forderungen müssen von Fall zu Fall mit einem verschiedenen Gewicht versehen werden, da sich ein allen Geräten und Verwendungszwecken genügender funktioneller Zusammenhang zwischen ihnen nicht aufstellen läßt.

¹⁾ W. Noeggerath, Thermodynamische Treibstoffuntersuchungen. Diss. T. H. Braunschweig 1939.

3. Bauaufwand und Treibstoffauswahl

Die eingangs aufgestellten Kennzahlen zeigen bei näherer Betrachtung, daß es sich bei den R-Antrieben um auf das höchste beanspruchte Geräte handelt. Insbesondere ist der Energiedurchsatz größer als bei allen bekannten Maschinen oder Feuerungen. Nimmt man z. B. entsprechend den vorhin mitgeteilten Werten je 1 Schub den nicht einmal extrem geringen Brennkammerinhalt von 5,6 l an, so erhält man damit bei einem einer Reaktionstemperatur von etwa 3000° entsprechenden Gemischheizwert von 1450 kcal/kg¹⁾ eine Brennkammerbelastung von $5200 \cdot 10^6$ kcal/h m³. Entsprechend erreicht die äußere Leistung des Gerätes bei einer Fluggeschwindigkeit von 1000 km je Stunde den Betrag von 66 FPS/l.

Naturngemäß muß für diese hohe Konzentration der Energieumsetzung auch ein Preis bezahlt werden, d. h. im allgemeinen wird der konstruktive Aufwand zur Beherrschung der Reaktion (gleichmäßige Zündung, Verhinderung von Reaktionsstockungen mit der daraus folgenden Explosionsgefahr) und der Wärmemengen (Kühlung) nicht klein werden. Dieser konstruktive Aufwand ist jedoch nicht nur aus Fertigungsgründen, sondern auch im Hinblick auf die Betriebssicherheit unerwünscht.

Wir haben nun von Anfang an versucht, den konstruktiven Aufwand dadurch zu verringern, daß solche Verfahren oder Treibstoffe ausgewählt wurden, bei denen die apparativen Schwierigkeiten geringer werden. Mit anderen Worten, der für die Erreichung höchster Leistung stets erforderliche Aufwand sollte von der Konstruktion genommen und entweder auf das Verfahren oder auf die Treibstoffe — durch Verwendung von Sondertriebstoffen — verlagert werden. Insbesondere für zum Masseneinsatz bestimmte Geräte mußte dies ein tragfähiger Gedanke sein; es hat sich aber in den letzten Jahren erwiesen, daß er für das gesamte R-Gebiet von Bedeutung ist.

a) Monergole Treibstoffgemische

Bekanntlich kann man mit Pulver die einfachsten überhaupt möglichen Raketen bauen. Dies rührt davon her, daß die beiden zur Reaktion zu bringenden Treibstoffkomponenten bereits im richtigen Verhältnis untereinander vermischt im Reaktionsraum vorliegen. Neben anderen Schwierigkeiten, die beim Pulverantrieb auftreten, ist das größte Hindernis für seine weitgehende Verwendung darin zu sehen, daß der Treibstoff im Reaktionsraum und nicht in den davon getrennten Speichern gelagert werden kann, da eine Zuführung des festen Pulvers mit einfachen Mitteln nicht möglich ist. Es lag daher nahe, die Verwendung monergoler

¹⁾ Mit HNO₃ als Sauerstoffträger.

Flüssigkeiten zu versuchen, d. h. solcher Treibstoffgemische, bei denen Sauerstoffträger, Brennstoffträger und Ballaststoff mitgeführt werden. In dieser Richtung konnten nun einige vielversprechende Anätze gefunden werden. Die Schwierigkeit liegt darin, daß die Treibstoffkombination einerseits im Reaktionsraum leicht und vollständig sich umsetzen soll, anderseits aber ein Zurückschlagen der Reaktion in die Speicher hinein unter allen Umständen vermieden werden muß. Das Mittel zur Lösung dieser entgegengesetzten Forderungen liegt darin, Stoffe mit hoher Anregungsenergie im weiteren Sinne — z. B. Verdampfungswärme, positive Bildungswärme — zu verwenden.



Abb. 8

Unterbrechung der Explosion eines Monergols in einer Leitung durch eingebauten Explosionsschutz

Im Rahmen unserer Zusammenarbeit mit Herren von der I. G. Farbenindustrie sind wir auf die besondere Eignung von Ammoniak als Brennstoff in monergolen Treibstoffgemischen hingewiesen worden. Die zunächst von Haußmann vorgeschlagene Lösung — Ammonitrat als Sauerstoffträger, Diverssehe Flüssigkeit — ist sicherheitsmäßig leicht zu beherrschen. Doch macht ihre Korrosivität und ihre Neigung zur Entmischung Schwierigkeiten. Ersetzt man nach Andrussow, das Ammonitrat durch Stickoxydul, so fallen die genannten Schwierigkeiten fort. Dagegen konnte durch Einbau wärmeabführender Körper in die Rohrleitungen wohl eine Explosionsicherheit, aber keine endgültige Sicherheit gegen angelaufene Detonationswellen erzielt werden (Abbildung 8). Aus diesen Gründen wurden die Versuche aufgegeben, obgleich wir glauben, daß die Monergole zumindest für Verlustgeräte, bei deren Abschluß auch keine Gefährdung der Umgebung eintreten kann (z. B. Gleitbomben), infolge der außerordentlichen Einfachheit der damit beschriebenen Geräte immer noch aussichtsreich erscheinen.

b) Lithergole Treibstoffe.

Der nächste Schritt war der, die eine Komponente als festen Stoff im Reaktionsraum zu belassen und nur die andere als Flüssigkeit, Dampf oder Gas einzuführen. Bei geschickter Anordnung der Oberflächen (Abstimmung der Austauschwege und der Verweilzeiten, Verstärkung der Diffusion durch aufgezwungene Turbulenz) kann man erreichen, daß sich die bewegliche Komponente von der Oberfläche der festen stets gerade so viel heranholt, als zum Ablauf einer heftigen Reaktion erforderlich ist. Man erhält somit auch mit diesem Verfahren außerordentlich einfache Geräte. Wir sind dabei nach einem Vorschlag von Andrussow den speziellen Weg gegangen, den Brennstoff in Form von Kohle in der Brennkammer mitzuführen und den Sauerstoffträger in Form von Stickoxydul einzuspritzen. Die Abbildung 9 zeigt einen Schnitt durch ein derartiges Versuchsgerät. Die Kohlefüllung ist hierbei, da es sich um ein Versuchsgerät handelt, aus einzelnen in der Längsrichtung durchbohrten Scheiben zusammengesetzt. Ein besonderer Wärmeschutz des Mantels erübrigt sich, da die Kohle eine geringe Wärmeleitfähigkeit hat, so daß man nur die Bohrungen nicht ganz bis nach außen anzuordnen hat. Die Zündung erfolgt in einfachster Weise durch einen kleinen Pulversatz, durch den zunächst körnige Aktivkohle entzündet wird. Wesentliche Arbeit wurde darauf verwendet, die Reaktion gleichzeitig auf der ganzen Länge des Ofens einsetzen zu lassen, damit der Abbrand nicht von einem Ende zum anderen, sondern quer zur Ofenachse erfolgt. Dies wurde durch eine Zelluloidfüllung der einzelnen Bohrungen erreicht, wodurch

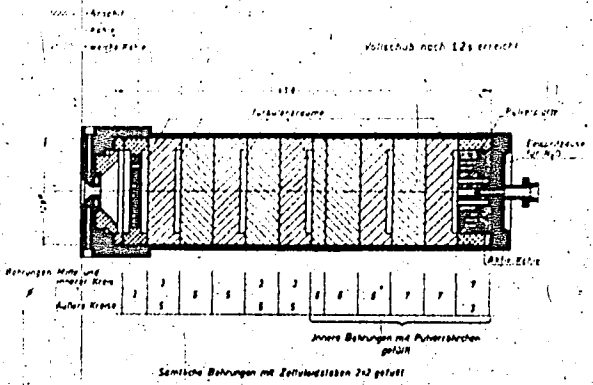


Abb. 9

Lithergol-Brennkammer; 50 bis 75 kg Schub, J = 2000 bis 2500 kg's

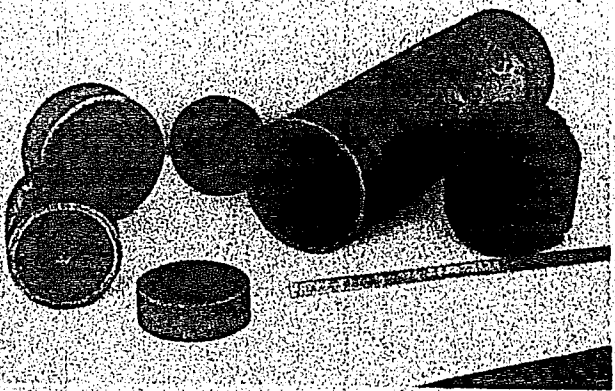


Abb. 10

Kohleinsätze von Lithergol-Geräten

die gesamte Oberfläche der Bohrungen bis zur Ausbläse hinein in kürzester Zeit auf die Entzündungstemperatur gebracht wird. Es ist immerhin bemerkenswert, daß die Zeit bis zur Erreichung des Vollschubes auf etwa eine Sekunde gebracht und das Schwankeu des Schubes auf etwa 5% herabgesetzt werden könnte. Bei den in der Abbildung 10 gezeigten Kohleeinsätzen handelt es sich um eine Weiterentwicklung in Richtung auf vereinfachte Herstellung, indem an Stelle der gebohrten Scheiben aus einzelnen Kohlerohren gesinterte Bündel verwendet wurden. Abbildung 11 zeigt eine weitgehend ausgebrannte Kohlscheibe; man erkennt die Gleichmäßigkeit des Abbrandes (die mittleren Bohrungen hatten von vornherein einen geringeren Durchmesser).

Die Weiterentwicklung dieses Verfahrens ist dadurch etwas behindert, daß eine Vergrößerung der Geräte über ein gewisses Maß (etwa 500 kg Schub, 40 s Brenndauer) schlecht möglich ist. Die Länge des Gerätes ist bei optimaler Strömungsgeschwindigkeit ja durch die erforderliche Verweilzeit festgelegt, so daß eine Vergrößerung des Schubes nur durch Parallelschaltung gleicher Geräte, also Vergrößerung des Durchmessers, erreicht werden kann. Immerhin könnten solche Geräte dort mit besonderem Vorteil eingesetzt werden, wo die geforderten Brennzeiten ein Pulvergerät nicht mehr zulassen und Wert auf ein Gerät von ähnlicher Einfachheit wie das Pulvergerät gelegt wird.

c) Hypergole Treibstoffe

Während in den bisher besprochenen Fällen die Vereinfachung im wesentlichen durch die Wahl eines besonders günstigen Verfahrens erstrebt wurde, haben wir bei den Hypergolverfahren den erforderlichen Aufwand bewußt auf die Treibstoffe verschoben. Dabei gingen wir von folgenden Gedankengängen aus:

Beim Auftreten von Reaktionsstockungen bilden sich im Reaktionsraum Mischungen — eine möglichst innige Vermischung der Komponenten muß zur Verkleinerung des Brennraums ja gerade angestrebt werden — aus dem Sauerstoffträger und dem Brennstoff, die in den meisten Fällen als hochbrannte Sprengstoffe anzusprechen sind. Zudem kann beim Erlöschen der Reaktion durch zeitweilige ungenügende Wärmezufuhr der Reaktionsablauf bei der Bildung besonders explosibler Zwischenprodukte (z. B. Peroxyde) steckenbleiben. Beachtet man nun die außerordentlich große in der Zeiteinheit durchgesetzte Menge — Durchsätze von über 100 kg/s werden bereits erreicht — so ist es klar, daß schon bei kürzesten Verzugszeiten sehr erhebliche Mengen von Sprengstoffen im Reaktionsraum gebildet werden. Es muß daher eine sofort kräftig einsetzende

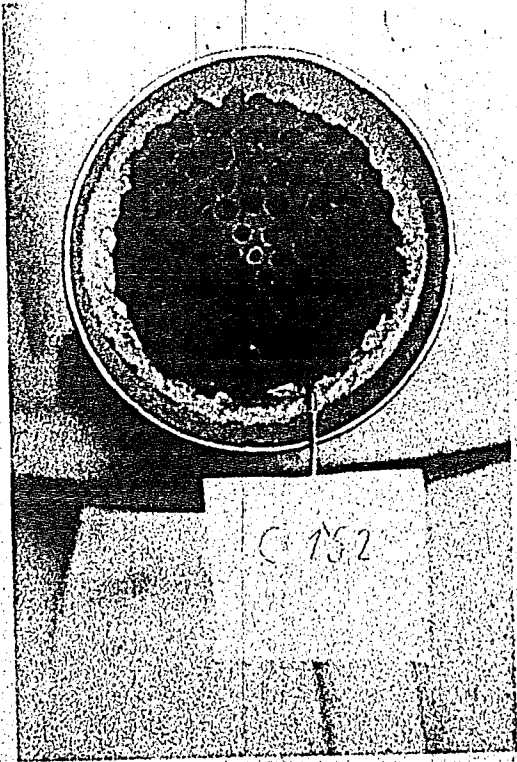


Abb. 11
Kohleeinsatz von Lithergol-Gerät nach teilweise m Ausbrand

und möglichst während der ganzen Betriebszeit wirksame Zündung vorgesehen werden. Dies führt, insbesondere bei regelbaren Geräten, zu einem nicht unerheblichen Aufwand.

Verwendet man aber hypergole, d. h. beim Zusammentreffen ohne weitere Energiezufuhr bis zu den Endprodukten sich umsetzende Treibstoffe,

so ist, genügend kurze Zündverzögerung vorausgesetzt, die Gefahr ohne jeden weiteren Aufwand behoben.

Es ist das Verdienst von Haubmann, bereits 1933 auf die hypergole Kombination Wasserstoffperoxyd und Hydrazinhydrat hingewiesen zu haben.

In Verfolgung der uns gestellten Aufgabe haben wir daher der Entwicklung der hypergolen Treibstoffe besondere Arbeit gewidmet. Dabei verstehen wir unter den eigentlichen Hypergolen nicht solche einzelne Stoffe, bei deren Zersetzung lediglich ihre negative Bildungsenergie frei wird, sondern Kombinationen aus mindestens zwei Treibstoffen, die unter Bildung gasförmiger Reaktionsprodukte unmittelbar miteinander reagieren.

Die Verwendung derartiger hypergoler Treibstoffe weist neben den genannten Vorteilen naturgemäß den Nachteil auf, daß bei Auftreten von Undichtigkeiten durch Beschuß oder sonstige Störungen zusammenlaufende Komponenten sich entzünden. Es ist jedoch zu beachten, daß, da Treibstoffe sich beim Zusammenlaufen an ihren Berührungsf lächen entzünden werden, die Bildung größerer Sprengstoffmengen, wie sie beim Zusammenlaufen nichthypergoler Treibstoffe unweigerlich erfolgt, nicht eintreten kann. Soweit bis jetzt Erfahrungen vorliegen, werden die hypergolen Stoffe von der Praxis auch gerade im Hinblick auf ihre Gefährlichkeit günstig beurteilt. Eine endgültige Entscheidung über ihre Verwendbarkeit wird wohl nur durch die Erfahrung gefällt werden können.

In der Tabelle der Abbildung 12 sind einmal die Anforderungen zusammengestellt, die an die hypergolen Brennstoffe gestellt wurden; zum anderen enthält die Tabelle Stoffgruppen, in denen die den Bedingungen genügenden Brennstoffe gesucht und gefunden werden konnten. Es wurden nur eigentliche Brennstoffe, nicht Spezialstoffe, die nur zur Zündung in Frage kommen, aufgenommen. Die Anforderungen sind sehr zahlreich, und es bildete mit ihnen wesentlichen Bestand unserer Arbeit, die Anforderungen überhaupt erst einmal aufzustellen, zu präzisieren und wenn möglich, das Maß ihrer Erfüllung dann durch Kennzahlen auszudrücken.

Bei hypergolen Stoffen stehen naturgemäß die chemischen Eigenschaften am Anfang der Betrachtung. Hier tritt gleich ein Widerspruch in sich auf, da die Stoffe einmal möglichst unendlich reaktionswillig sein sollen, andererseits aber auch unter erschwerten Bedingungen unbegrenzte Lagerfähigkeit aufweisen sollen. Damit ist die Schwierigkeit des Problems ausgedrückt, und es wird nicht einfach sein, die Erfüllung beider Bedingungen durch grundsätzliche theoretische Betrachtungen zu klären.

	Sauerstoffträger-H ₂		Sauerstoffträger-HNO ₂		
	Amine	Säuren	Amine	Säuren	Säuren
Eigenschaften	zu Hypergol (H ₂ O ₂)		zu Hypergol (H ₂ O ₂)		
Chemisch	sehr gut	gut	sehr gut	gut	sehr gut
Physikalisch	sehr gut	gut	gut	sehr gut	sehr gut
Thermodynamisch	gut	gut	gut	gut	sehr gut
Allgemein	beständig	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Bemerkungen	Rückstandsfrei		Mischbarkeit		

Abb. 12

Zusammenstellung der z. Z. in Frage kommenden Gruppen hypergoler Brennstoffe

Den meisten hypergolen Treibstoffkombinationen wird zur Verkürzung des Zündverzuges ein Katalysator beigelegt werden müssen; in allen bis jetzt untersuchten Fällen wurde mit metallischen Katalysatoren, die in der einen oder anderen Komponente gelöst sind, gearbeitet. Gerade die Frage der Löslichkeit und Beständigkeit der Katalysatoren ist ein Arbeitsgebiet für sich.

Von den erforderlichen physikalischen Eigenschaften sind hier nur die wesentlichsten genannt, nämlich die Lage des Erstarrungs- bzw. Entmischungspunktes, die Zähigkeit insbesondere bei tiefen Temperaturen und der die Verwendung ebenfalls beeinflussende Dampfdruck (Tanken, Dampfblasenbildung in Pumpen usw.). Darüber hinaus interessieren noch die Oberflächenspannung, die Kennwerte des Wärmeüberganges usw. Besondere Schwierigkeiten machen die Stoffe im Hinblick auf den Erstarrungspunkt bzw. den Entmischungspunkt, da es sich in den meisten Fällen um Mischungen aus zahlreichen Komponenten handelt.

Die thermodynamischen Eigenschaften weisen im allgemeinen keine allzu großen Unterschiede auf. Die Bedeutung des Energieinhaltes ist,

wie bereits erwähnt, verschieden zu bewerten, je nachdem welche Temperaturen im Reaktionsraum zugelassen werden. Auf die besondere Bedeutung der Gemischdichte wurde schon hingewiesen.

Neben den reinen stofflichen Eigenschaften können auch andere Punkte, wie der Preis, die Beschaffungslage und die physiologische Einwirkung, von maßgeblicher Bedeutung werden. Insbesondere die Beschaffungslage ist naturgemäß das entscheidende Kriterium für die Verwendbarkeit eines Stoffes, falls seine sonstigen Eigenschaften den gestellten Bedingungen hinreichend genügen.

Die hypergolen Brennstoffe unterscheiden sich wieder nach den verwendeten Sauerstoffträgern, von denen hier nur die beiden für das Hypergolverfahren zunächst in Aussicht genommenen angeführt seien: Wasserstoffperoxyd und Salpetersäure. In beiden Fällen haben wir zunächst mit Aminen gearbeitet, im Falle des Wasserstoffperoxyds infolge der außerordentlich günstigen Eigenschaften der Reaktion des Hydrazinhydrats mit dem Wasserstoffperoxyd, im Falle der Salpetersäure deshalb, weil die Salzbildungswärme zur Einleitung der Reaktion besonders geeignet erschien. Daneben sind jedoch eine ganze Reihe von anderen Stoffen getreten. Bei dem Wasserstoffperoxyd, das selber keinen Stickstoff enthält, interessieren hierbei besonders stickstofffreie Stoffe, da man damit für die Marine weitgehend spurfreie Reaktionsgase erzeugen kann. Für die Reaktion mit Salpetersäure haben sich Brennstoffe als sehr

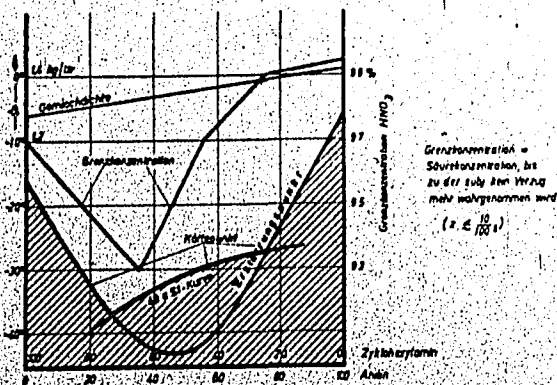


Abb. 13

Kennwerte des hypergolen Brennstoffsystems: Anilin + Cyclohexylamin

geeignet erwiesen, die im wesentlichen aus Vinyläthern bestehen. Diese von uns Visole genannten Stoffe sind besonders günstig bei Verwendung von Mischsäure als Sauerstoffträger, die günstigere korrosive Eigenschaften als die reine Salpetersäure aufweist. Endlich befinden sich in der letzten angegebenen Gruppe der Stoffe mit hohem Reduktionspotential zahlreiche Brennstoffe, die oft ausgezeichnete Zündeigenschaften aufweisen und daneben auch den übrigen Bedingungen genügen.

Beinahe alle vorgeschlagenen hypergolischen Brennstoffe bestehen aus Mischungen verschiedener Einzelstoffe. Dadurch werden die einzelnen Erscheinungen wesentlich kompliziert, andererseits gibt gerade die Mischung die Möglichkeit, einzelne Eigenschaften nach einer gewünschten Richtung stärker ausprägen. So verläuft oft die Reaktionswilligkeit einer Mischung zweier Stoffe (Abbildung 13) ähnlich wie das Erstarrungsdiagramm des Systems. In der Abbildung ist die durch die Grenzkonzentration ausgedrückte Reaktionswilligkeit aufgetragen, d. h. die Säurekonzentration, bis zu der die Zündung ohne wahrnehmbaren Verzögerung erfolgte. Man erkennt, daß die Mischungen eine wesentlich größere Reaktionswilligkeit als die einzelnen Komponenten aufweisen können, eine Erscheinung, die bei zahlreichen anderen Stoffen bestätigt wurde. In dem gleichen Diagramm ist auch der Verlauf der tiefsten für das Gemisch zulässigen Temperatur, des sogenannten Kältepunktes, eingetragen. Der Kältepunkt ist an beiden Enden des Diagramms durch den Erstarrungspunkt, in der Mitte durch die höchste zulässige Zähigkeit, die hier für einen bestimmten Fall mit 40 c. St. angenommen wurde, bestimmt. Bei dieser Stoffzusammenstellung fällt das Optimum, bezogen auf den Kältepunkt und auf den Zündverzögerungswert, etwa zusammen. Es gibt aber auch Stoffgemische, bei denen das Gegenteil der Fall ist; hier muß man dann oft durch die Zugabe weiterer Komponenten versuchen, die Lage der Optima in Einklang zu bringen.

Abbildung 14 sind Diagramme aus der Entwicklung der Visolbrennstoffe. Hier handelt es sich um ein Gemisch aus vier Komponenten, und zwar zwei verschiedenen Visolen, dem Vinyläthyläther (Visol 1) und dem Butandioldivinyläther (Visol 4) und zwei verschiedenen organischen Aminen, dem Anilin und dem Methylanilin. Es ist jeweils der Zündverzögerung über der Zusammensetzung des Amingemisches aufgetragen. Die punktierten Kurven entsprechen den Stoffen mit 10 Volumenteilen, die gestrichelten den Stoffen mit 15 Volumenteilen und die ausgezogenen Kurven den Stoffen mit 20 Volumenteilen Amingemisch. Die vier Diagramme endlich unterscheiden sich durch die Zusammensetzung des Visolgemisches. Ohne ins einzelne gehen zu wollen — interessant ist z. B. die Umwandlung des Maximums in ein Minimum bei Veränderung der Zusammensetzung des Visolanteils — möchte ich auf die außer-

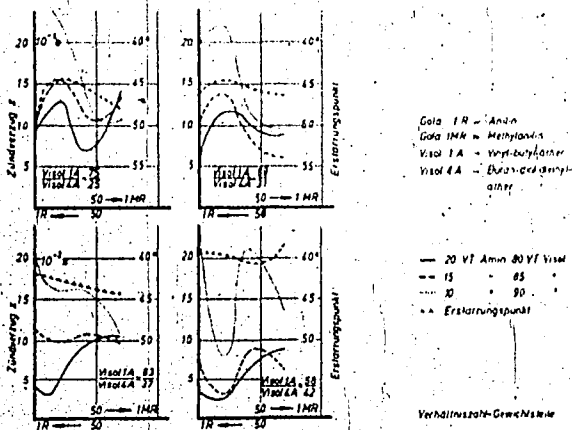


Abb. 14

Einfluß der Zusammensetzung der Visol- und der Amin-Komponente bei Visol-Brennstoffen

ordentlichen Unterschiede hinweisen, die bereits geringe Änderungen des absoluten Gehaltes der einzelnen Aminkomponenten hervorbringen. Diese große Empfindlichkeit hat die Bearbeitung außerordentlich erschwert. Die Systeme weisen eben auch bezüglich Reaktionswilligkeit alle Eigenschaften von Mehrstoffsystemen auf, und es liegt dem Techniker nahe, auch hier von einem Eutektikum zu sprechen.

Zu den angegebenen Zündverzügen ist noch zu erwähnen, daß sie in keiner Weise den Anspruch erheben, absolute Werte zu sein. Der Zündverzug hängt vielmehr von der Art der Zusammenbringung der Komponenten ab. Dabei tritt sogar die Erscheinung auf, daß die eine Anordnung, die für ein Stoffsystem günstige Werte ergibt, für ein anderes Stoffsystem große Zündverzögerungen ergeben kann.

Wir haben die in Abbildung 15 gezeigte einfache Apparatur verwendet. Eine Injektionspritze wird durch eine Feder gleichmäßig und reproduzierbar entleert; die Betätigung erfolgt elektromagnetisch. Durch die Spritze wird der Sauerstoffträger in den in einem Tiegel vorgelagerten Brennstoff gespritzt. Die Zündverzögerungen werden durch Photozelle registriert.

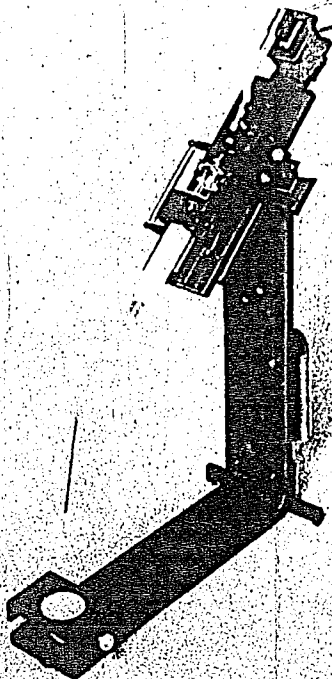
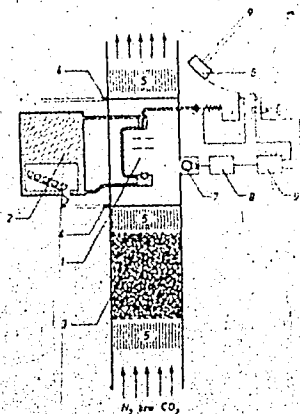


Abb. 15
Spritze zur Bestimmung des Zündverzuges hypergoler Treibstoffe

Für Untersuchungen bei tiefen Temperaturen wird eine Apparatur Verwendung finden, die schematisch in Abbildung 16 aufgezeichnet ist. Kennzeichnend für sie ist, daß die Reaktion in sauerstofffreier Atmosphäre von tiefer Temperatur abläuft, wobei Treibstoffe und Geräte ebenfalls auf die entsprechende Temperatur gebracht sind.

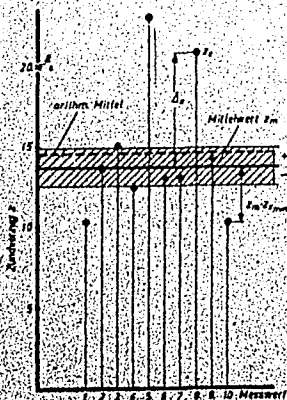
Aber auch mit ein und derselben Zündanordnung und ein und demselben hypergolen Gemisch treten stets Schwankungen der gemessenen Zündver-



1	Reaktionsgemisch
2	Reagenzien für die Temperaturnachführung
3	Temperaturmessung
4	CO ₂ -Leit
5	Speicherschleife
6	Gasventile
7	Anleitung mit Kompressoren der Apparaturkomponenten
8	Verdichter
9	Schneidventil

Abb. 16

Apparatur zur Bestimmung der Zündverzögerung hypergolischer Treibstoffe bei tiefer Temperatur



z_n = Einzelwert

z_m = Mittelwert

$\frac{z_m}{z_n}$ = Gewicht des Einzelwertes

$$z_m = \frac{\sum_{n=1}^n z_n \frac{z_m}{z_n}}{\sum_{n=1}^n \frac{z_m}{z_n}} = \frac{n}{\sum_{n=1}^n \frac{1}{z_n}}$$

Mittlere Streuung

$$\Delta_m = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n \frac{\Delta z_n^2}{z_n^2}}{(n-1) \sum_{n=1}^n \frac{1}{z_n^2}}}$$

$$\Delta_m = z_m - z_n$$

Streuungen sind durch Angabe von z_m und Δ_m bzw. von z_m und $z_m z_{m,max}$ unter Anführung der Testmethode

Abb. 17

Zündverzögerung hypergolischer Treibstoffe, Bildung des Mittelwertes

züge auf, deren Differenz jedoch wieder ein Charakteristikum des einzelnen Hypergols ist. Man kann nun diskutieren, ob eine Mittelwertbildung aus den einzelnen Messungen überhaupt sinnvoll und, falls ja, welcher Mittelwert anzugeben ist. Wir sind zu der Ansicht gekommen, daß den günstigsten Zündverzügen die größere Bedeutung zuzuerkennen ist, da es einmal die Aufgabe der Technik ist, Mischdüsen mit optimalen Bedingungen zu schaffen, andererseits in der einzelnen Mischdüse stets diskrete Bedingungen auftreten werden, so daß damit gerechnet werden kann, daß an irgendeiner Stelle die Bedingungen, für den kürzesten Verzugs erreicht werden.

In diesem Sinne wird der einzelne gemessene Zündverzugs z mit einem Gewicht $= z_m/z_x$ belegt, so daß die kleinen Verzugs ein großes, die großen ein kleines Gewicht erhalten. Für den Mittelwert ergibt sich somit (Abbildung 17):

$$Z_m = \frac{\sum z_x}{n} \cdot \frac{Z_m}{Z_x} = \frac{\sum \frac{z_m}{z_x}}{\sum \frac{1}{z_x}}$$

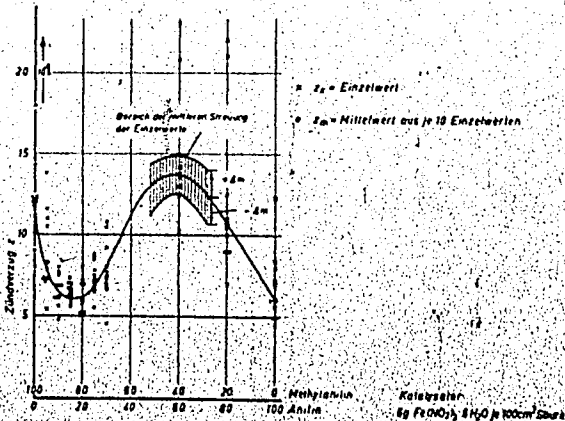


Abb. 18
Zündverzugs des hypergolen Treibstoffes Gola 11MR + HNO₃ ($\gamma = 1,515$)

Für die mittlere Streuung erhält man in ähnlicher Weise

$$M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}}{(n-1) \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}}} \quad (1. \quad Z_{m-1} \quad Z_i)$$

Das Verhalten des Brennstoffes wird also durch die Angabe des mittleren Zündverzuges und durch die Angabe der mittleren Streuung gekennzeichnet. Das Ergebnis einer solchen Auswertung zeigt Abbildung 18.

4. Schlußbetrachtung

Es wird wohl Verständnis dafür vorhanden sein, daß der zweite Teil meiner Ausführungen subjektiv gefärbt ist. Aber wir hoffen, durch die systematische Verfolgung der an sich einfachen Idee, den Bauaufwand der R-Geräte von der Verfahrens-, bzw. Treibstoffseite her zu beeinflussen, nicht nur der Weiterentwicklung der R-Antriebe gedient, sondern darüber hinaus noch die Forschung auf dem Gebiet der Treibstoffchemie angeregt zu haben.

Es bleibt mir noch übrig, meinen Mitarbeitern, insbesondere den Herren Noeggerath und Egelhaaf, zu danken, die sich unermüdlich für die einmal als richtig anerkannte Idee eingesetzt haben. Des weiteren gilt mein Dank der verständnisvollen Förderung der Arbeiten seitens des Hauptlaboratoriums der I. G. Farbenindustrie unter der Leitung von Herrn Reppe, dessen Mitarbeiter Herr Haußmann die chemische Seite unserer Arbeiten weitgehend beeinflußt hat.