

Über R-Treibstoffe

Von Walter Hertel

Raketentriebwerke setzen Energien in Schubarbeit um, die grundsätzlich aus Reaktionen freigemacht werden, bei denen aus bekannten Gründen der Luftsauerstoff im Gegensatz zu den üblichen energieliefernden Reaktionen gebräuchlicher Wärmetriebwerke als Reaktionspartner ebenso ausgeschlossen bleiben muß wie auch der Luftstickstoff als Ballastgas.

Solche Reaktionen sind, geordnet nach der auf die Gewichtseinheit des Treibstoffes bezogenen frei werdenden Energie:

- a) Der Atomzerfall,
- b) die Assoziation von H zu H_2 mit einer frei werdenden Reaktionswärme von 52.500 Kcal/Kg, der gegenüber die frei werdende Energie der erstgenannten Reaktion etwa um eine Zehnerpotenz größer ist. Und schließlich
- c) Oxydationsreaktionen, deren Reaktionswärme rund 1500 Kcal/Kg beträgt, falls organische Stoffe als Brennstoff dienen.

Da von den beiden erstgenannten Reaktionen heute noch keine technisch zu handhaben ist, werden zur Zeit grundsätzlich nur die Oxydationsreaktionen in der Raketenpraxis benutzt. Nur Treibstoffe dieses Reaktionstypus sollen hier besprochen werden. Auch sollen in diesem Referat die Pulvertreibstoffe von einer Besprechung ausgenommen werden.

Der für die Oxydationsreaktion erforderliche Sauerstoff muß außer dem Brennstoff vom Gerät mitgetragen werden. Die Summe aller Reaktionsteilnehmer, also insbesondere bei den Oxydationsreaktionen die Summe von Brennstoff + Sauerstoff bzw. Sauerstoffträger und gegebenenfalls + Ballaststoff, wird als Treibstoff definiert.

Über Sauerstoff + Sauerstoffträger wird in den weiteren Referaten dieser Arbeitstagung im einzelnen berichtet werden. Ich kann mich deshalb auf eine Diskussion der Brennstoffe beschränken und werde die Sauerstofffrage nur dort berühren, wo die Wahl des Brennstoffes durch den Sauerstoff bzw. Sauerstoffträger bedingt ist. Es ist in diesem Kreise bekannt, daß sich die Wahl des Sauerstoffträgers im Rahmen der hier zu besprechenden Reaktionen von überragender Bedeutung für die

Auslegung der R-Triebwerke erwiesen hat. Diese Frage soll hier nicht weiter erörtert werden. Das hohe spezifische Gewicht von etwa 1,4 der auf Salpetersäurebasis beruhenden Treibstoffe sowie die bessere Versand- und Lagerfähigkeit hat im Laufe der Arbeit die Salpetersäure an die Spitze der Sauerstoffträger gestellt. Ihre Reaktions-eigenschaften sowie ihre sonstigen physikalischen Daten zeichnen sie fernerhin aus. Diese Umstände haben in letzter Zeit zu einer intensiven Arbeit auf dem Gebiet der mit Salpetersäure treibstoffbildenden Brennstoffe geführt. Die mit solchen Treibstoffen erzielten geringen spezifischen Verbräuche lassen einen gewissen Stand der Entwicklung erkennen, von dem aus weitere Treibstoffverbesserungen im Bereich der Oxydationsreaktion nur noch um wenige Procente zu erwarten sein dürften. Es hat daher eine Arbeit um die Ausnutzung der letzten Möglichkeiten einzusetzen. Und wenn, nachdem umfangreiche, vornehmlich thermodynamische Betrachtungen die an R-Treibstoffe zu stellenden Anforderungen klargestellt hatten, die Erarbeitung der bekannten Treibstoffkombinationen rein empirisch zu dem jetzt Erreichten geführt hat, dann glaube ich, daß die Ausnutzung der letzten, in solchen Treibstoffen gegebenen Möglichkeiten des Rüstzeuges der modernsten Arbeitsrichtungen der organischen Chemie insbesondere dort, wo die physikalische Chemie ihr die Hand reicht, bedarf. Den Chemiker an diese Arbeit dort heranzuführen, wo der Thermodynamiker und Ingenieur, die bisher die wesentliche und bedeutungsvolle Arbeit auf dem Gebiet der R-Treibstoffe geleistet haben, ihm die Aufgabe stellt, betrachte ich als wesentlichen Inhalt meines Referates.

Welche Anforderungen müssen an einen R-Treibstoff gestellt werden? Die an einen R-Treibstoff zu stellenden Bedingungen lassen sich in innere und äußere aufgliedern. Als äußere Bedingungen hat er alle die Einflüsse ohne wesentliche Änderungen seiner Eigenschaften zu ertragen, denen er während der Lagerung im Vorratsbehälter und während seines Aufenthaltes im Gerätetank ausgesetzt ist. Es werden von ihm vornehmlich gefordert:

- a) gute Haltbarkeit während längerer Lagerung,
- b) geringe Agressivität auf das Material der Tanks,
- c) niedriger Dampfdruck,
- d) Kältebeständigkeit bis -55°C für Flugtriebwerke bzw. bis -40°C für andere R-Antriebe,
- e) flache Viskositätskurve, insbesondere möglichst gleicher Viskositätstemperaturgang von Brennstoff- und Sauerstoffträger.

Schwieriger ist die Festlegung der zu erfüllenden inneren Bedingungen. Ausschlaggebend für die Wahl einer Treibstoffkombination ist lediglich

die durch diese zu erzielende höchste Flugleistung. Dieser letzte Begriff beinhaltet eine Anzahl von Faktoren, die im Falle eines Flugzeuges mit Otto- oder Dieselmotor die Anforderungen an den Kraftstoff nicht oder kaum berühren. Der hohe Treibstoffverbrauch der R-Triebwerke bedingt dagegen infolge des erforderlichen großen Tankraumes eine Berücksichtigung des Tankvolumens. Um das letztere möglichst klein zu halten, wird ein hohes spezifisches Gewicht des Treibstoffes sowie ein niedriger spezifischer Verbrauch verlangt. Das Verhältnis dieser Faktoren zueinander ist von wesentlicher Bedeutung. Die Rechnung ergibt, daß z. B. ein Treibstoff größerer Dichte trotz schlechteren spezifischen Verbrauches einem solchen geringerer Dichte bei wesentlich günstigerem spezifischen Verbrauch durchaus ebenbürtig sein kann. Das geht z. B. aus folgender von den Bayerischen Motoren-Werken auf Grund einer durchgeführten Rechnung aufgestellten Tabelle hervor:

Treibstoff	$O_2H - H_2S$	$O_2H - CH_3OH$	$HNO_3 - \text{Amine}$
Triebwerksgewicht	220 kg	132 kg	110 kg
Leergewicht der Zelle	1520 kg	1432 kg	1410 kg
Treibstoffgewicht	1680 kg	2166 kg	2390 kg
Vollgewicht	3200 kg	3600 kg	3800 kg
spezifischer Verbrauch	3,5 kg/ts	4,5 kg/ts	5 kg/ts
spezifisches Gewicht	0,4 kg/ltr	1 kg/ltr ¹⁾	1,4 kg/ltr
Volumen der Tanks	4200 ltr	2170 ltr	1700 ltr
Rumpfquerschnitt	1,8 m ²	1,2 m ²	1 m ²
Flügelfläche	15 m ²	17 m ²	18 m ²
C_{wo}	0,012	0,009	0,0083
Restflugzeit	19,5 min ¹⁾	20,5 min ¹⁾	19,5 min ¹⁾

¹⁾ Ohne Verdampfungsverluste

Auf die Frage des möglichst hohen spezifischen Gewichtes möchte ich etwas später noch einmal zurückkommen. Zunächst soll die Beeinflussung des spezifischen Verbrauches durch den Treibstoff noch näher betrachtet werden. Eine Senkung des spezifischen Verbrauches scheint vorerst durch einen möglichst hohen Heizwert des Brennstoffes möglich zu sein. Das trifft aber nur bedingt zu. Hinzukommen muß aus der Verbrennung oder als zusätzlicher Ballaststoff eine möglichst große Masse

Gas. Ohne diese Masse würden hohe Verbrennungstemperaturen erreicht, durch die so hohe Ausströmgeschwindigkeiten im Verhältnis zur Fluggeschwindigkeit bedingt wären, daß der äußere Wirkungsgrad rapide absinken und damit eine Energieverschleuderung statthaben würde. Das Molekulargewicht des Verbrennungsgases soll möglichst klein sein, damit das Volumen möglichst groß ist. Um ein möglichst großes Gasvolumen zu haben, sollen alle Verbrennungs- und Zerfallsprodukte gasförmig sein. Ob diese letztere Forderung zurückgestellt werden kann, wenn neben organischen Stoffen auch noch zusätzlich Metall verbrannt wird, muß von Fall zu Fall entschieden werden. Die spezifische Wärme der Verbrennungsgase soll klein und die Dissoziation möglichst gering sein. Der Dissoziationsverlust ist für die verschiedenen Treibstoffe fast gleich, ändert sich jedoch mit der Verschiebung des Verhältnisses von N_2 zu H_2O in Richtung einer Zunahme mit zunehmendem H_2O -Anteil. Es ist selbstverständlich, daß für die Größe des spezifischen Verbrauches die Wahl des Sauerstoffträgers von hervorragender Bedeutung ist. Dieser Einfluß ist zu beachten, wenn eine Verbesserung des spezifischen Verbrauches von der Brennstoffseite versucht wird.

Ich möchte nun noch einmal auf die Forderung nach einem möglichst großen spezifischen Gewicht zurückkommen. Diese Forderung wird grundsätzlich mit der zusätzlichen auch schon genannten Forderung nach einem möglichst kleinen Molekulargewicht der Verbrennungsgase gestellt. In bezug auf das erforderliche Tankvolumen und die aus der Reaktion gewonnene Energie ersetzt man die Forderung eines hohen spezifischen Gewichtes deshalb besser durch die Forderung eines möglichst kleinen Kraftstoffvolumens pro Tonnensekunde Schub.

Die hohen Treibstoffdurchsätze bedingen eine hohe Reaktionsgeschwindigkeit, um bei voller Ausnutzung des Treibstoffes den Reaktionsofen an Volumen und Gewicht möglichst klein halten zu können. An dieser Stelle will ich einfügen, daß wir drei Arten der Treibstoffe unterscheiden:

- a) normale mit Fremdzündung arbeitende, nicht selbstreagierende Treibstoffe,
- b) selbstreagierende Treibstoffe, die beim Zusammentreffen von Brennstoff und Sauerstoffträger ohne Fremdzündung selbst zünden, sogenannte Hypergole, von denen das System H_2O_2 + Hydrazinhydrat das erste dieser Art war, und
- c) sogenannte Monergole, Einstoffgemische, bei denen Brennstoff und Sauerstoffträger von vornherein miteinander gemischt sind, oder aber bei denen das Brennstoffmolekül den Oxydationssauerstoff selbst in geeigneter Bindung trägt, wie z. B. beim Nitroglycerin oder anderen Sprengstoffen.

Für bemannte Geräte dürfte dieser letztgenannte Treibstofftyp wegen des hohen Gefahrenmomentes grundsätzlich ausscheiden, jedoch sollte für andere Zwecke, z. B. die Flakrakete oder ähnliche Geräte, die in letzter Zeit vernachlässigte Bearbeitung monergoler Treibstoffe wieder mehr aktiviert werden. Ich denke daran, daß diese Arbeiten an solche anschließen könnten, die in letzter Zeit auf dem Gebiet flüssiger Sprengstoffe, wie Mischungen von Salpetersäure mit Acetonitril bzw. Pyridin bzw. Cyclohexylamin oder auch Äthylenchlorid, wobei allerdings freies Chlor entsteht, durchgeführt worden sind.

Von den erstgenannten zwei Treibstofftypen geht die Entwicklung immer mehr in Richtung der Hypergole, da sie eine weitgehende Vereinfachung des Gerätes zulassen und andererseits gerade wegen ihrer Selbstreaktion eine größere Betriebssicherheit gewährleisten. An diese Treibstoffe werden hohe Anforderungen an die Zündgeschwindigkeit gestellt, damit sich bei dem hohen Durchsatz nicht zu große Treibstoffmengen im Reaktionsofen ansammeln können. Zündverzögerungen über 0,1 sec bei Zimmertemperatur und bei -40°C bzw. -55°C werden nicht zugelassen. Solche Treibstoffe haben meistens auch hohe Verbrennungsgeschwindigkeiten. Jedoch geht mit einer guten Zündwilligkeit nicht immer eine hohe Verbrennungsgeschwindigkeit einher. So gibt es sehr zündwillige Amine mit sehr schlechten Brenngeschwindigkeiten. Durch geringe Zusatzmengen eines mit dem betreffenden Sauerstoffträger selbstreagierenden Brennstoffes zu einem nicht selbstreagierenden Brennstoff konnte der spezifische Verbrauch wesentlich gesenkt, d. h. die Verbrennung innerhalb des Reaktionsofens verbessert werden.

Außer den genannten Anforderungen an die Treibstoffe bzw. speziell die Brennstoffe, müssen noch gewisse Forderungen an die Viskosität gestellt werden, die einmal in dem Temperaturbereich von $+60^{\circ}\text{C}$ bis -55°C innerhalb gewisser Grenzen bleiben muß, während andererseits die Viskositätskurve in Abhängigkeit von der Temperatur des Brennstoffes mit der des Sauerstoffträgers möglichst parallel verlaufen soll, um eine möglichst einfache Regelung der Stoffzufuhr zu ermöglichen.

Welche Brennstoffe sind nun seither als Komponenten für hypergole Treibstoffe entwickelt worden, die den genannten Anforderungen möglichst weitgehend entsprechen? Die Forderung nach einer guten Selbstzündung mit dem Sauerstoffträger scheidet von vornherein eine große Anzahl sonst geeigneter Verbindungen aus. Außer dem schon genannten hypergolen System H_2O_2 -Hydrazinhydrat, das u. a. aber nicht kältebeständig ist, haben sich Amine, Ketene und die sogenannten Visole mit dem Sauerstoffträger Salpetersäure als hypergole Treibstoffe mit guten

Zündeigenschaften bewährt. Durch Mischen verschiedener Komponenten lassen sich auch die physikalischen Bedingungen, wie Viskosität usw., hinreichend erfüllen.

Die gemeinsamen Merkmale dieser Brennstoffe fallen stark heraus. Auf der einen Seite ist es die Aminogruppe, auf der anderen die Doppelbindung, die die hohe Reaktionsfreudigkeit gegenüber HNO_3 bestimmt. Das etwa ist der Stand der Arbeiten. Darüber hinaus sind auch bereits Ansätze da, die gewisse Gesetzmäßigkeiten in der Reaktionsfähigkeit, z. B. der Amine erkennen lassen. So reagieren z. B. die aliphatischen Amine bis zur Kohlenstoffzahl 5 gut mit Salpetersäure. Je geringer die Kohlenstoffzahl ist, um so größer ist die Reaktionsfreudigkeit. *n*-Butylamin hat einen Zündverzug von schon etwa 1 sec, Isobutylamin reagiert schon gar nicht mehr. Die Verzweigung wirkt also reaktionsverzögernd. Andererseits steigt die Reaktionsfreudigkeit mit der Anzahl der Alkyle am Stickstoff. So ist das Triäthylamin in bezug auf sein Zündverhalten wesentlich besser als das Diäthyl- oder gar das Monoäthylamin. Eine besondere Stellung nehmen die aromatischen Amine ein. Ihr Zündverzug läßt sich wesentlich, im Gegensatz zu denen der aliphatischen Amine, durch Zusatz von FeCl_3 als Katalysator zur Salpetersäure gegeben, verbessern. Gegebenenfalls ist auch die Stellung von Seitenketten am aromatischen Ring von Bedeutung für das Zündverhalten. So ist z. B. die Stellung der beiden Methylgruppen im Xylidinmolekül von entsprechend ausschlaggebender Bedeutung. Den kürzesten Zündverzug mit 0,3 sec haben die beiden 1, 3, 2- und 1, 3, 4-Xylidine. Es folgt darauf mit 0,8 bis 1 sec die 1, 3, 5-Verbindung, dann 1, 4, 2-Xylidin mit 1,0 bis 1,2 sec Zündverzug und schließlich 1, 2, 3-Xylidin mit 1 bis 1,8 sec Zündverzug. Das Mesithin, das gegenüber dem Xylidin mit zwei Methylgruppen drei Methylgruppen hat, reagiert schon nicht mehr. Wie bei den Aliphaten eine Verzweigung den Zündverzug verlängert, so wird auch bei den Aromaten der Zündverzug einerseits mit zunehmender Zahl der Seitenketten größer, während andererseits die Länge der Seitenketten eine weitere Reaktionsverzögerung bewirkt. So sind folgende Zündverzögerungen gemessen worden:

a) Methylanilin	0,5 bis 0,6 sec
b) Dimethylanilin	0,7 » 0,9 »
c) Äthylanilin	0,4 » 0,6 »
d) Diäthylanilin	etwa 1,5 »
e) Amylanilin	0,8 bis 1,3 »

Wie die aromatischen Amine, so sind auch die Visole stark durch den Eisenkatalysator der Salpetersäure in ihrer Zündfreudigkeit zu beeinflussen. Dasselbe gilt für das gleichfalls ungesättigte α/β -Pinen, das zudem noch den Vorteil des sehr hohen spezifischen Gewichtes von 1 hat,

ohne, wie z. B. die Visole, mit Ballastatomen beschwert zu sein. In der Gruppe der Terpene wären diejenigen mit Ringspannung im 3er- und 4er-Ring sicher einer näheren Untersuchung wert. In der gleichsinnigen Beeinflussungsmöglichkeit der aromatischen Amine und der ungesättigten Visole könnte vielleicht ein Hinweis für einen ähnlichen Reaktionsablauf gegeben sein. Die Visole sind ja eigentlich nicht selbstentzündlich, jedoch sehr reaktionsfreudig, so daß es nur noch einer kleinen zusätzlichen Energie bedarf, um die Entzündung zu bewirken. Bei den Aminen dürfte die Salzbildung mit der Aminogruppe zu örtlichen Reaktionswärmen führen, durch die der labile zur restlosen Oxydation führende Zustand herbeigeführt wird. Auf einen wesentlichen Unterschied im Zündverhalten der Amine einerseits und der Visole andererseits muß ich hier noch hinweisen. Bei sinkender Temperatur geht die Zündgeschwindigkeit der Amine mit Salpetersäure verständlicherweise zurück, während diejenige der Visole, wenn auch nicht viel, so aber doch deutlich zunimmt. Von den vorgetragenen gesammelten Beobachtungen müßte nunmehr von seiten der Strukturchemie und der theoretischen organischen Chemie ausgegangen werden, um die letzten Möglichkeiten der Brennstoffverbesserung noch auszunutzen, soweit von der Verbrennungsreaktion organischer Verbindungen in den Raketentriebwerken noch nicht abgegangen werden kann.

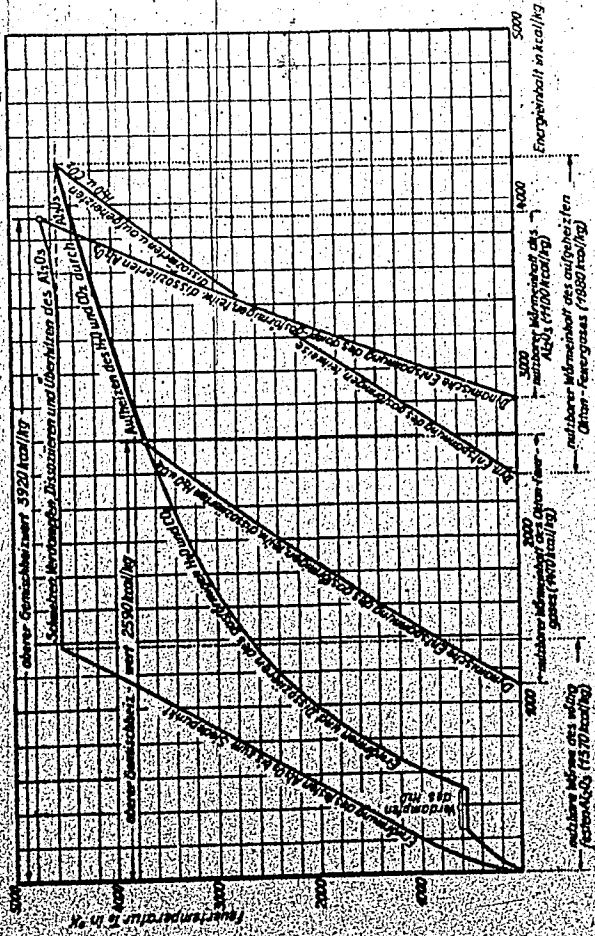


Abb. 1
Energie-Temperatur-Diagramm des Aluminium- bzw. Kohlenwasserstoff-Brandes in Sauerstoff bei 100 at Feuerdruck

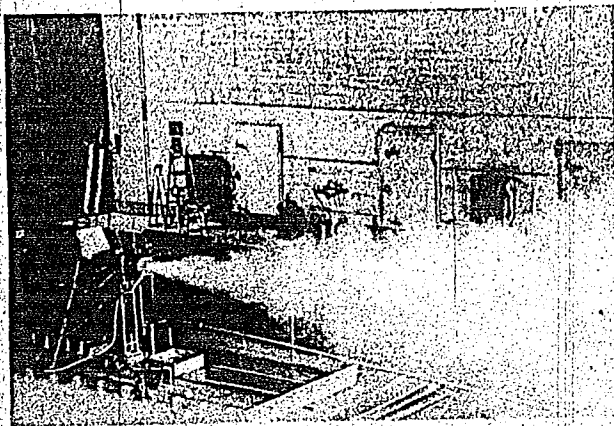


Abb. 3

1-Tonnen-Raketennotor-Prüfstandsversuch mit Aluminium-Gasöl-Dispersion als Brennstoff, der im Abgasstrahl weiße Wolken von Korundstaub bildet

strahl sind die weißen Wolken kondensierten Al_2O_3 -Staubes sehr deutlich erkennbar. Die Versuche ergaben gute Pumpfähigkeit und Zündfähigkeit der Dispersion und keinen meßbaren Einfluß auf die Auspuffgeschwindigkeit.

Busemann: Das von Herrn Sänger angeführte Kapitel, wieviel von dem Heizwert eines Kraftstoffes tatsächlich in einer Düse ausnutzbar ist, bedarf wahrscheinlich noch sehr weitgehender Untersuchungen. Bisher zieht man von dem Heizwert der chemischen Reaktion gewisse Wärmemengen ab, die man als unzugänglich ansieht, etwa die bei der Kondensation anfallende Verdampfungswärme gewisser Rauchgasbestandteile, wie wir das vom unteren Heizwert her kennen. Aussagen darüber, wieviel Prozent des Heizwertes aber in einer Düse von so beschränkter Länge, wie sie praktisch an einer Rakete ausgeführt werden kann, tatsächlich für die Umsetzung in Geschwindigkeit zugänglich sind, konnten bisher nur in Form von Abschätzungen gemacht werden.

Danköbler: Ich möchte zu dem letzten Thema noch etwas sagen. Da müssen Sie auch K-Werte wissen und es wurden Werte von etwa 1,2 genannt. Nun ist ja die Frage immer die bei der adiabatischen Entspannung: Was macht die Dissociation, geht sie zurück oder geht sie nicht zurück? Wie sind die K-Werte hier berechnet?

Sänger: Bei der Berechnung wurde angenommen, daß die Dissociation sich während der Entspannung nicht ändert, da die Aufenthaltsdauern in der Entspannungsdüse für die Neueinstellung chemischer Gleichgewichte zu kurz erschienen.

Danköbler: Dann mag es ungefähr hinkommen, denn wenn die Dissociation zurückgeht, dann kommt man auf K-Werte der Größenordnung 1,1. Das ergibt sich ziemlich

eindeutig. Ferner besteht die Frage: Lohnt es sich nun noch, irgendwie Metalle zusätzlich zu verbrennen, denn man kommt eigentlich so wesentlich über 3500° nicht hinaus, einfach wegen der Dissoziation, die wir ja schon in normalen Verbrennungsgasen der Kohlenwasserstoffverbrennung haben. Wenn man also mehr Wärme hierin packt durch eine parallel geschaltete Verbrennung von Metall, dann vergrößert man eigentlich nur die Dissoziation, aber zunächst nicht den Schmelzwert. Also, wenn man nicht gleichzeitig zunimmt, daß die Dissoziation während der Entspannung zurückgeht, dann kann man eigentlich diese zusätzliche Wärme gar nicht ausnutzen oder nicht wesentlich ausnutzen.

Sänger: Die Verlängerung des Kohlenwasserstoffdiagrammes in Abbildung 1 nach rechts oben über die Verbrennungsendtemperatur des Kohlenwasserstoffes hinaus ist nach den Verhältnissen statischer Gasgleichgewichte von CO_2 und H_2O unter Berücksichtigung der Komponenten CO , H_2O , OH , O_2 , H_2 , O und H gerechnet und stellt den wahrscheinlichsten weiteren Temperaturanstieg bei zusätzlicher Energiezufuhr dar. Man muß demnach über 3700° K hinaus durch Zufuhr von Energie an das Kohlenwasserstoff-Feuergas noch Temperatursteigerungen erhalten, und wenn die Kurve auch wegen der zunehmenden Dissoziation nur mehr sehr flach steigt, so ist bei dem angegebenen Mischungsverhältnis von Aluminium zu Kohlenwasserstoff doch die verfügbare Verdampfungswärme des Al_2O_3 von der Größe des Kohlenwasserstoff-Gemischteiles selbst, so daß eine Temperaturerhöhung des Kohlenwasserstoffbrandes durch die Parallelverbrennung von Aluminium auf etwa 4500° K wahrscheinlich ist.

Damköhler: Ja, da ist natürlich immer die Frage, wie sicher sich die Rechnungen in dem oberen Temperaturgebiet erweisen. Und welchen Siedepunkt haben Sie für das Aluminiumoxyd da angenommen?

Sänger: Der Siedepunkt des Al_2O_3 bei 100 at Druck war zu etwa 4550° K angenommen worden.

Damköhler: Also normalerweise würde dann das Aluminiumoxyd noch nicht verdampfen.

Sänger: Das Aluminiumoxyd verdampft natürlich erst nach Erreichung der Verdampfungstemperatur und nach Zufuhr der Verdampfungswärme.

Damköhler: Ja, man wird das wahrscheinlich nicht erreichen bei dem Raketen- druck. Also man würde doch so sagen: Zunächst verbrennt das Aluminium, und zwar ist es vermutlich eine heterogene Verbrennung. Und nun fragt es sich: Wird dieses Aluminiumoxyd noch in einem bestimmten Teil der Reaktion wirklich verdampfen oder nicht?

Sänger: Ich nehme Verdampfung nicht an, weil die zur Verdampfung notwendige Energie bereits an die begleitenden aufzuheizenden Kohlenwasserstoff-Feuergase abgegeben worden ist und daher nicht zur Verfügung steht.

Damköhler: Ich möchte es auch deshalb nicht annehmen, weil man ja nachher noch Aluminiumoxydnebel gesehen hat. Und es ist nicht anzunehmen, daß sich Aluminiumoxydnebel bilden würden, wenn das Aluminiumoxyd vorher restlos verdampft ist. Denn zu einer Kondensation braucht man wieder Kondensationskerne. Und da wird es ähnlich sein wie bei der Wasserdampfkondensation, man müßte eine gewisse Übersättigung haben. Es wird also schon so sein, daß sich das Aluminiumoxyd aus Festpartikelchen direkt bildet und als solche auch im Gas schweben bleibt. Dann könnte man auch sagen, daß man diesen ganzen Verdampfungsvorgang von Aluminiumoxyd wahrscheinlich bei einer solchen Berechnung nicht zu berücksichtigen braucht.

Sänger: Tatsächlich liegt der angeführten Berechnung auch die Annahme zugrunde, daß die Al_2O_3 -Verdampfung nicht stattfindet, sondern daß die Verdampfungswärme den Begleitstoffen des Al_2O_3 zugute kommt und dadurch zum Nutzschieb beiträgt, während die sonst ja überhaupt verloren wäre.

Danköhler: Dann ist da die andere Frage, wie vollständig geht überhaupt eine Reaktion vor sich, und das hängt nun wiederum zusammen mit der Frage, wie groß soll man eine Brennkammer bauen? Diese Frage führt auf Ähnlichkeitsbetrachtungen, wie Herr Lutz schon vorher gesagt hat. In diese Betrachtung geht auch ein, wie schnell geht die Reaktion eigentlich zu Ende. Und da muß ich fragen: Hat man Hinweise, welcher Vorgang die gesamte Verbrennungszeit hauptsächlich bestimmt? Bei einer Flüssigkeitsrakete ist es doch folgendermaßen: Zunächst spritzt man den Brennstoff ein. Der Brennstoff wird verdampft, Brennstoff und Sauerstoffträger miteinander. Dann kommt eine Vermischungsperiode, dann kommt der Zündvorgang zusammen mit dem chemischen Brennvorgang, und dann wird das auch noch nicht gleich zum Gleichgewicht gehen, sondern das Gleichgewicht wird eine gewisse Zeit zur Einstellung brauchen, und dann kommt das Gas zur Düse und pufft aus; und in der Düse geht meinetwegen die Dissoziation auch nicht zurück. Aber für die ganze Bemessung der Brennkammer ist nun maßgebend, wieviel von diesen Einzelvorgängen gehen zu Ende. Und da ist es klar, manche Einzelvorgänge kann man hydrodynamisch beeinflussen. Das wird vermutlich sein der Verdampfungsvorgang (indem man die Wärme an die Tropfen etwas besser heranträgt, etwa durch Turbulenz), ebenso auch der Vermischungsvorgang, den wird man auch hydrodynamisch beeinflussen können. Was dann kommt, kann man nicht mehr hydrodynamisch beeinflussen. Und nun wäre es ja vielleicht für die Gestaltung eines Brennkammerraumes ganz wichtig, zu wissen, wie ist es bei der praktischen Rakete. Spielen da die chemischen Reaktionszeiten gegenüber diesen hydrodynamisch beeinflussbaren Reaktionszeiten eine Rolle, oder ist das nicht der Fall. Und da könnte man sich zunächst einmal den Versuch denken, daß man unter denselben hydrodynamischen Bedingungen, also mit derselben Zerstäuberdüse, zweimal eine Verbrennung vornimmt, das eine Mal in einer etwas längeren Kammer und das andere Mal in einer etwas kürzeren Kammer, und dann sieht, ob sich beide Male derselbe Schub ergibt oder nicht. Ich frage, sind solche Versuche schon einmal gemacht worden? Man könnte natürlich dann gleichzeitig daran gehen, auch in verschiedenen Abständen längs der Brennkammer durch eine besondere Anordnung den Verbrennungsablauf spektroskopisch zu vermessen, um zu sehen, wie die Temperatureinstellungen sind. Man könnte z. B. im OH-Spektrum die Rotationsverteilung messen und feststellen, ob sich da nach einem gewissen Abstand noch etwas ändert oder nicht. Ich glaube, daß diese Sache doch sehr wichtig wäre. Denn wenn man überhaupt einmal die Frage der Brennkammergestaltung klären will, dann muß man eben wissen, sind es nur hydrodynamische Effekte, wo man sie dann wahrscheinlich auch irgendwie mit Ähnlichkeitsbetrachtungen durchkommt, oder sind noch irgendwelche chemische Reaktionszeiten maßgebend, wo Ähnlichkeitsbetrachtungen viel schwieriger sind.

Ich wollte da noch eine andere Frage ansprechen, nämlich die der Zündverzögerung. Der Zündvorgang in der Brennkammer selbst wird ja wohl ein anderer sein als bei der Prüfung nach der Tiegelmethode. In der Brennkammer ist es doch so, daß man zunächst durch die beiden getrennten Düsenöffnungen einströmt. Dann laufen die beiden Stoffe eine gewisse Zeit nebeneinander her und erst wenn sie das richtige Mischungsverhältnis haben, werden sie kunden, auch wiederum nach einer weiteren Zeit. Also ist es so, daß man vermutlich aus der Zündverzögerungsmessung nicht unmittelbar die Zeiten herauskriegen wird, die man für die Zündung in der Brennkammer benötigt.

Lutz: Es ist uns klar, daß die Zündverzugszeiten, die in dem Tiegel mit der einfachen Methode gemessen werden, nicht dieselben sind, wie sie im Ofen auftreten. Aber es muß ja schließlich für den Vergleich von Treibstoffkombinationen eine einfache Methode gefunden werden, um schnell Vergleiche machen zu können. Wenn wir nun die vielen Untersuchungen -- wir haben über 1000 Kombinationen untersucht, in den letzten 1 1/2 Jahren -- im Ofen hätten machen müssen, dann wären wir in Jahren nicht fertig geworden. Wir hoffen nun, daß immerhin die einfache Methode zumindest für den ersten Vergleich eine Unterlage schafft. Zu berücksichtigen ist, daß nicht immer eine Reaktion, die in der einfachen Testapparatur gut geht, auch im Ofen sofort gut hin- kommt. In vielen Fällen muß die Mischweise im Ofen noch entsprechend entwickelt werden.

Ober die notwendige Länge von Brennräumen sind schon Untersuchungen durch- geführt worden im Zusammenhang mit der Vollständigkeit des Ausbrandes. Es ist klar, was Herr Sänger auch schon sagte, daß ein bestimmter Zusammenhang bestehen muß. Es muß aber auch auf eines hingewiesen werden: Der entstehende Schub ist nicht sehr stark abhängig von der Güte des Ausbrandes. Natürlich wird er in gewissem Ausmaß davon beeinflusst, aber ein Teil der Reaktion verläuft noch in der Düsenöffnung und kurz nachher im erweiterten Teil. Wenn wir unsere Brennräume so konstruieren müßten, daß die Reaktion vollständig abgelaufen wäre bis zur Düse, dann würden sie gewiß wesentlich länger werden als sie heute sind. Ich nehme an, daß die Herren aus der Industrie mir hier zustimmen werden. Und aus diesem Grunde ist das Problem etwas schweriger; insgesamt ist deshalb die Frage im Augenblick schwer zu beantworten. Hier muß nun die Forschung einsetzen und durch Klärung der inneren Vorgänge unsere Erkenntnisse erweitern.

Hertel: Ich möchte die Bedeutung des von Herrn Damköhler angeschnittenen Pro- blems der Zündverzugsmessung noch einmal unterstreichen. Ganz sicher ist der Zünd- verzug in der Brennkammer ein anderer als er in der Versuchsvorrichtung im Tiegel ge- messen wird. Die Reaktionsweise verschiedener Treibstoffe bzw. Treibstoffkombina- tionen und damit sowohl der Zündverzugs als auch die Brenngeschwindigkeit können u. a. in Abhängigkeit vom Mischverhältnis sehr verschieden sein. Dafür liegen auch schon Beobachtungen vor. So wurde das Zündverhalten von Brennstoffen im Tiegel bei ein- tropfender Salpetersäure mit der Zeitlupe beobachtet. Dabei zeigten sich auffällige Unterschiede des Zündvorganges zwischen Amin- und Visoltreibstoffen trotz annähernd gleicher Zündverzugszeiten (gemessen mit der Tiegelmethode). Fällt die Salpetersäure in einen Tiegel mit Visolbrennstoff, so spritzt eine gewisse Menge Flüssigkeit in die Höhe. Die Zündung erfolgt oberhalb der Brennstoffoberfläche im Bereich der durch das Einfallen der Salpetersäure herausgeschleuderten Tröpfchen, die Brennzone senkt sich darauf auf die Treibstoffoberfläche im Tiegel. Im Falle der Amin-Treibstoffe erfolgt dagegen bei einfallendem Salpetersäurestrahl die Zündung auf der Brennstoff- oberfläche. Solche Beobachtungen können vielleicht mit einer Erklärung dafür abgeben, daß sich verschiedene Treibstoffe in der Brennkammer gegensätzlich wie bei der labor- mäßigen Zündverzugsmessung verhalten können.