

DESIGN UND AUSLEGUNG EINER BRENNKAMMER FÜR EIN HYBRIDRAKETENTRIEBWERK

K. Razdelenko
Hochschule für angewandte Wissenschaften Augsburg
An der Hochschule 1
Augsburg, D-86161
Deutschland

Zusammenfassung

Im Rahmen des STERN-Programms des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, entwickelt ein Studententeam an der Hochschule Augsburg eine Experimentalrakete mit Hybrid-Raketentriebwerk. Alle Komponenten (Struktur, Elektronik, Nutzlast, Fallschirm und Antrieb) werden im Rahmen des Projekts erarbeitet. Besonders bei der Auslegung des Antriebs müssen viele unbekannte Variable, die sich nur experimentell ermitteln lassen, bestimmt werden. Um dies zu erreichen wird ein Engineering-Modell des Antriebs benötigt. Dieses Modell wird auf einen Teststand angeschlossen, wodurch es möglich ist viele der Unbekannten durch Messversuche empirisch zu ermitteln.

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung, der Auslegung und dem Design der Brennkammer des Engineering-Modells, unter Berücksichtigung aller notwendigen Anschlüsselemente (z.B. für Injektor und Sensoren). Das Modell wird nach den Fertigungszeichnungen, die das Resultat der Entwicklung aus dieser Arbeit sind, gefertigt und bildet eine Grundlage für spätere Modelle, die durch die gewonnen Erkenntnisse optimiert und angepasst werden können. Das Engineering-Modell soll hauptsächlich für Messungen und Untersuchungen der Betriebsparameter dienen. Um zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, wird das Teststandtriebwerk möglichst robust und steif ausgelegt. Auf der Grundlage der 3D-CAD Dateien des in hier vorgestellten Triebwerks und den Erkenntnissen aus den Testreihen wird es später möglich einen optimierten Entwurf des Flugmodells in Leichtbauweise, hauptsächlich aus Faserverbundwerkstoffen und Leichtmetallen, zu fertigen.

1. AUFGABENSTELLUNG

Viele der Randbedingungen für die Auslegung der endgültigen Rakete sind unbekannt. Zu diesen gehören unter anderem: das Abbrandverhalten, der tatsächliche Druck in der Brennkammer bzw. die Druckänderung in der Brennkammer während des Betriebs, die Abweichung des theoretischen Schubs vom tatsächlichen Schub (falls eine solche Abweichung auftritt), die tatsächliche Temperatur in der Brennkammer usw. Das Abbrandverhalten ist bei Hybridrakentriebwerken sehr komplex und hängt von verschiedenen Randbedingungen ab. So kann allein durch die Wahl des richtigen Injektors ein günstiges Abbrandverhalten erzielt werden, während durch einen unpassenden Injektor ein unerwünschtes Ergebnis erzielt wird.

Um die unbekannt Parameter festzustellen ist eine Vielzahl an Messungen notwendig. Die Rakete, die für die Flüge verwendet werden soll, wird auf den Ergebnissen dieser Messung entwickelt und optimiert. Dafür ist es wichtig die Abmaße der einzelnen Bauteile, wie die Düsengeometrie oder die Brennkammerlänge, zu variieren und die Auswirkungen dieser Änderungen auf die Messergebnisse festzuhalten, um die optimale Bauteilkonfiguration zu ermitteln. Für die Messungen wird das Triebwerk horizontal auf den Linearlagern des Teststands befestigt. Die Hauptaufgabe der hier vorgestellten Arbeit ist das Design und die Auslegung

eines Triebwerks für den Teststandbetrieb in Metallbauweise, mit den dazugehörigen Festigkeitsnachweisen, 3D-CAD Modellen und allen benötigten Fertigungsdaten/-zeichnungen. Das Triebwerk hat die Bezeichnung HyER EM. Es steht für Hybrid Experimental Raketentriebwerk Engineering-Modell.

2. BRENNKAMMERROHR

„Die Bezeichnung Brennkammer gilt im eigentlichen Sinne nur für den Raum, in dem wie in einer Flüssigkeitsrakete die Treibstoffe verbrannt werden. Obwohl bei Hybridraketen im Brennkammer diese Vorgänge ohne zusätzliche Einrichtungen nicht abgeschlossen werden können und man daher besser von einem Treibsatzbehälter sprechen sollte, wird der Begriff Brennkammer für diesen Teil des Triebwerks verwendet, da er sich allgemein durchgesetzt hat.“ Robert Schmucker [2]. Der feste Brennstoffblock wird in die Brennkammer eingelegt und der flüssige Oxidator wird über einen Injektor in die Brennkammer eingespritzt. Dabei soll die Verteilung möglichst fein und gleichmäßig erfolgen. Für eine Brenndauer von zehn Sekunden und einen Innendruck von 20 bar wird eine Brennstofflänge von ca. 354 mm benötigt. Der Anfangsdurchmesser der Brennstoffbohrung beträgt ca. 29,5 mm und der Enddurchmesser 73 mm. Es soll aber mehr Brennstoff verwendet werden, was einige Vorteile mit sich führt. Zum

einen fungiert der nicht verbrannte Brennstoff als zusätzlicher Thermalschutz für die Brennkammerwand, zum anderen kann man die Brenndauer, falls es benötigt wird, verlängern. Außerdem soll es verhindern, dass die Flamme über eine längere Zeit direkt auf die Brennkammer trifft, indem der Brennstoff an einigen Stellen lokal schneller abbrennt als an anderen. Durch den Brennstoffzuschlag liegt der Innendurchmesser der Brennkammer in einem Bereich zwischen 100 und 130 mm. Um die Wände der Brennkammer während des Verbrennungsvorgangs zu schützen wird ein Thermalschutz, aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK), zwischen der Brennkammer und dem Brennstoff eingefügt. Tests, die an der Hochschule Augsburg durchgeführt wurden, zeigen, dass bei Flammeneinwirkung die Kunststoffmatrix an der Oberfläche verbrennt, die Fasern aber in Tankt bleiben. Dadurch bildet sich eine Abbrandschicht, die eine gute Isolation für die darunter liegenden Schichten bietet. Der Werkstoff der Brennkammer soll ein Metall sein. Eine Aluminiumlegierung eignet sich jedoch schlecht. Auch wenn diese leichter als Baustahl ist, kann, laut Schmucker [2], die hohe Wärmeausdehnungszahl, wegen der Temperaturverschiebungen, zu großen Änderungen der Kammerabmessung führen. Ein guter Werkstoff für das Triebwerk ist Baustahl, da er bei guten Festigkeitswerten auch günstig im Preis ist. Die Dicke der Brennkammerwände wird über die „Kesselformel“ (1) berechnet. [6]

$$(1) \quad \sigma_t = \frac{p_i * r_i}{t}$$

$$p_i = p = 60 \frac{N}{mm^2}$$

$$r_i = \frac{d_i}{2}$$

$$\sigma_t = R_{p0,2N}$$

σ_t : Tangentialspannung

t : Wanddicke

p : maximaler Systemdruck

$R_{p0,2N}$: Streckgrenze für Normabmessungen

d_i : Innendurchmesser der Brennkammer

Um die Kosten für die Fertigung der Brennkammer so gering wie möglich zu halten, ist es sinnvoll mit genormten Teilen, also mit Rohren, zu arbeiten. Dies spart nicht nur Material, sondern verkürzt auch die Bearbeitungszeit. Nach DIN EN 10220 [4] kommen zwei Rohre in Frage, nämlich die mit Außendurchmesser 114,3 mm und 139,7 mm. Das Rohr mit dem Außendurchmesser 139,7 mm ist besser geeignet, da man damit eine größere Auswahl an Innendurchmesser, durch Nachbearbeitung, erzielen kann und damit eine größere Variation an Innendurchmessern gewährleistet. Bei einem Gespräch mit einem Lieferanten stellte sich heraus, dass die von ihm tatsächlich lieferbaren Durchmesser wie folgt sind: Außendurchmesser 140 mm, Innendurchmesser 100 mm, damit eine maximale Wanddicke von 20 mm.

Die Wahl des Stahls fiel auf S355JR. Dieser Werkstoff weist eine hohe Streckgrenze, bei einem relativ günstigen

Preis, auf und ist auch für hoch beanspruchte Tragwerke geeignet. Eine stabile und robuste Brennkammer für den Teststand ist notwendig, um akkurate Messungen durchzuführen und damit die nötigen Parameter präzise zu bestimmen.

Durch das Umstellen der „Kesselformel“ ergibt sich die folgende Gleichung (2) für die Wanddicke des Brennkammerrohrs:

$$(2) \quad t = \frac{p_i * r_i}{\sigma_t} = \frac{p * d_i}{2 * R_{p0,2N}}$$

$$(3) \quad R_{p0,2} = K_T * R_{p0,2N}$$

$R_{p0,2}$: Streckgrenze des Bauteil (auf Bauteilgröße umgerechnet)

K_T : Technologischer Größeneinflussfaktor (für Baustahl mit Durchmesser $d < 30$ mm beträgt dieser immer 1)

d : gleichwertiger Durchmesser; für Rohre ist gleich der Wanddicke

Aus Gleichung (2) geht hervor, dass die Wanddicke proportional zum Innendurchmesser ist.

3. TRIEBWERKSAUFBAU: VARIANTE 1

Es gibt mehrere Möglichkeiten die Brennkammer im Triebwerk einzubauen. Bei der ersten Variante wird die Brennkammer als einfaches Rohr ausgelegt. Zur Befestigung wird sie durch zwei Flansche (Injektor- und Düsenfläche), mit Hilfe von durchgehenden Gewindestangen, eingespannt (BILD 1).

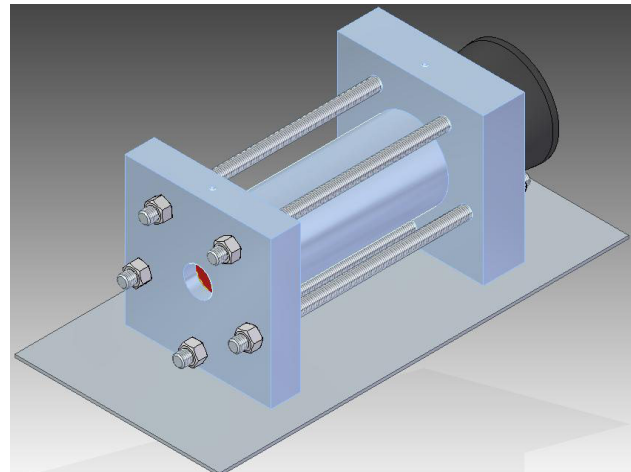


BILD 1. Variante 1 (schematische Darstellung)

Die Flansche sind quadratisch mit Gewindebohrungen unten, für eine Befestigung am Teststand (die Platte in BILD 1 ist eine Möglichkeit für die Anbindung an den Teststand). Auf der gegenüberliegenden Fläche wird eine einfache Bohrung für Druck- und gegebenen Falls auch Temperatursensoren angebracht. Düse und Injektor können einfach ausgetauscht werden, indem sie in die Flansche eingesteckt und anschließend mit Schrauben befestigt werden. Da der gesamte Aufbau sehr modular ist, können auch alle anderen Triebwerkskomponenten leicht gewechselt werden. Bevor jedoch das Design in

allen Einzelheiten entworfen wird, ist es notwendig die Probleme anzuschauen, die bei dieser Variante auftreten können.

3.1. Wärmeausdehnung

Durch das Einspannen des Brennkammerrohrs ist keine freie Ausdehnung möglich, was zu thermisch induzierten Spannungen führt. Da die Temperatur, die sich in der Brennkammerwand tatsächlich einstellt, unbekannt ist, können die auftretenden Thermospannungen auch nicht berechnet werden. Stattdessen kann man die Streckgrenze des Bauteils $R_{p0,2}$ als die maximal zulässige thermisch induzierte Spannung annehmen und daraus die maximal zulässige Erwärmung ΔT berechnen (Gleichung 4). [6] [12]

$$(4) \quad \varepsilon_{th} = \alpha * \Delta T \rightarrow \Delta T = \frac{\varepsilon_{th}}{\alpha}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{th}$$

$$(5) \quad \varepsilon = \frac{\sigma_{zul}}{E}$$

$$\sigma_{zul} = R_{p0,2}$$

$$(6) \quad \Delta T = \frac{R_{p0,2}}{E * \alpha}$$

ε_{th} : thermische Dehnung

α : Wärmeausdehnungskoeffizient

σ_{zul} : maximal zulässige Spannung

Für den gewählten Werkstoff S355JR errechnet sich somit ein ΔT von 141 °C. Dieser Wert berücksichtigt jedoch nicht den Innendruck während des Betriebs, sondern gibt nur an um wie viel Grad sich die eingespannte Brennkammer im unbelasteten Zustand erwärmen darf bevor ihre Streckgrenze erreicht ist. Unter Berücksichtigung des maximalen Betriebsdrucks ($p_{max} = 60$ bar) verringert sich σ_{zul} auf 349 N/mm². Damit ergibt sich ein ΔT während des Betriebs von ca. 139 °C. Ein Material mit einer höheren Streckgrenze kann eine größere Temperaturänderung mitmachen, was allerdings zu höherer Druckkraft auf die Flansche führt. Diese Kraft muss wiederum von den Gewindestangen aufgenommen werden. Die Ausnutzung der Zugfestigkeit, die viel höhere Werte als die Streckgrenze aufweist, ist nicht sinnvoll, da beim Überschreiten der Streckgrenze des Bauteils eine plastische Verformung eintritt. Dadurch ändert sich die Geometrie des Brennkammerrohrs und die Messungen können stark verfälscht werden.

3.2. Knickung

Ein wichtiger Punkt im Zusammenhang mit der Druckbelastung des Brennkammerrohrs, sowohl aus thermischer Spannung als auch aus Vorspannung, ist die Knicksicherheit. Da auch für diese Rechnung die tatsächlichen Lasten nicht bekannt sind, wird die Knickspannung (8) (Spannung die zum Ausknicken des Bauteils benötigt wird) berechnet.

$$(7) \quad F_K = \frac{\pi^2 * E * I}{l_k^2}$$

I : Flächenmoment 2. Grades

l_k : Knicklänge (hier EULER-Fall 4, also $l_k = l/2$)

F_K : EULERSche Knicklast

$$(8) \quad \sigma_K = \frac{F_K}{A}$$

A : Querschnittsfläche des Brennkammerrohrs

σ_K : Knickspannung

Bei der gewählten Geometrie des Querschnitts benötigt man eine Spannung von 144 kN/mm², um das Brennkammerrohr zum Ausknicken zu bringen. Da aber die Zugfestigkeit bei 510 N/mm² liegt, wird das Material noch bevor es zum Knicken kommt versagen.

3.3. Befestigung des Triebwerks auf dem Teststand

Das Triebwerk wird mit vier Schrauben auf dem Teststand befestigt. Diese Schrauben sollen nur die Schubkraft aufnehmen. Der maximale Schub beträgt ca. 3125 N (berechnet aus p_{max}). Daraus ergibt sich eine Querkraft für jede einzelne Schraube von 781,25 N. Nach Roloff/Matek, Maschinenelemente, Tabellenbuch [4] reicht ein Schraubendurchmesser von 6 mm in der Festigkeitsklasse 8.8.

3.4. Auslegung der Gewindestangen

Die Gewindestangen werden zum Fixieren des Brennkammerrohrs zwischen den Flanschen verwendet. Um eine gute Abdichtung zu gewährleisten wird das Brennkammerrohr so an die Flansche angepresst, dass der Anpressdruck gleich dem höchst möglichen Innendruck ($p_{max} = 60$ bar) ist. Während des Betriebs treten zusätzlich thermische Spannungen auf. Die Gewindestangen sollen in der Lage sein die Überlagerung beider Lasten aufzunehmen ohne sich plastisch zu verformen oder zu brechen. An der Oberfläche des Brennkammerrohrs muss ein Temperatursensor (z.B. Thermoelement) angebracht werden, um die Temperatur während der Verbrennung zu messen und notfalls, beim Überschreiten der zulässigen Temperaturdifferenz von $\Delta T = 139$ °C (siehe Kapitel 3.1), den Betrieb abzubrechen, da die Brennkammer sich sonst plastisch verformt und damit nicht mehr zum Messen verwendet werden kann.

$$(9) \quad F_{min} = p * A$$

$$(10) \quad F_{max} = R_{p0,2} * A$$

A : Querschnittsfläche des Brennkammerrohrs

F_{min} : Mindestkraft zu abdichten der der Brennkammer

F_{max} : Maximalkraft

Bei dem Innendurchmesser von 130 mm und der Wanddicke von 2,5 mm beträgt die Querschnittsfläche 1041 mm². Daraus resultiert eine Mindestkraft von 62,4 kN und eine Maximalkraft von 369,4 kN.

Die Berechnung des passenden Kernquerschnitts der Gewindestangen wird in Gleichung (11) durchgeführt:

$$(11) \quad A_3 = \frac{F_{max}}{R_{p0,2s}} * \frac{1}{N_s}$$

A_3 : Kernquerschnitt

$R_{p0,2s}$: Streckgrenze der Gewindestange

N_s : Anzahl der Gewindestangen

In TAB 1 sind die benötigten Durchmesser in Abhängigkeit von der Anzahl und der Festigkeitsklasse (FK) dargestellt.

N _s	d		
	FK 8.8	FK 10.9	FK 12.9
4	18	14	14
5	16	14	12
6	14	12	11
7	14	11	10
8	12	10	9
9	11	10	9
10	11	9	9

TAB 1. Gewindestangendurchmesser

Wie man deutlich sieht ist selbst bei den hohen Festigkeitsklassen entweder eine große Anzahl an Gewindestangen oder ein großer Durchmesser notwendig.

3.5. Abdichtung des Triebwerks

Für eine gute Abdichtung werden Dichtungselemente, zum Beispiel O-Ringe, benötigt. Die vorhandene Wanddicke reicht jedoch nicht aus, um so ein Dichtungselement zu verwenden. Es ist möglich eine Dichtung aus expandierter Graphitfolie zu benutzen. Diese kann als ein Ring mit beliebigen Abmessungen zugeschnitten werden. So ist es möglich eine Dichtung, die an die Querschnittsfläche des Brennkammerrohrs angepasst ist, zu erzeugen. Die Dichtungsringe werden an beide Stirnflächen des Brennkammerrohrs angelegt und anschließend an die Flansche angepresst (BILD 2).

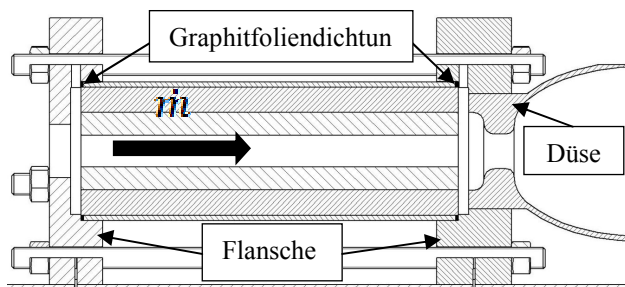


BILD 2. Schema des Triebwerks mit Dichtungen

Die Graphitfolie ist im begrenzten Maße elastisch und kann somit der thermischen Ausdehnung nachgeben. Das Problem jedoch ist, dass man zum Abdichten noch vor dem Betrieb bereits eine Vorspannung braucht, die im

Betrieb zusätzlich mit der thermischen Last überlagert wird. Dadurch kann die Dichtung zu stark komprimiert und auf diese Weise beschädigt werden, wodurch sie nicht mehr richtig abdichtet. Dasselbe gilt für den Fall, dass die Dichtungen nicht in axialer Bauweise, sondern in radialer Bauweise, eingebaut werden. Außerdem ist es nicht möglich mehr als eine Dichtung pro Seite einzubauen. Sollte diese beim Einbau beschädigt werden oder schlecht aufliegen, verringert oder verliert sich die Dichtkraft und das Triebwerk wird undicht, da es keine sekundäre Dichtung gibt. Für eine bessere Abdichtung, zum Beispiel durch eine zweite Dichtung, ist es notwendig die Wanddicke des Brennkammerrohrs zu vergrößern. Dadurch vergrößert sich jedoch der Querschnitt und damit erhöht sich die thermische Kraft, die auf das eingespannte Brennkammerrohr wirkt. Das bedeutet, dass die zulässige Erwärmung ΔT verringert wird.

3.6. Fazit zu Variante 1

Wie man sehen kann, zeigen sich bereits in diesem Entwicklungsstadium deutliche Probleme auf Grund der thermischen Spannungen. Die großen Lasten, die eine Vielzahl von großen Gewindestangen in hoher Festigkeitsklasse erfordern und den Aufbau sperrig, und unhandlich machen, erzeugen auch schwerwiegende Probleme beim Abdichten des Triebwerks. Eine andere Variante des Triebwerksaufbaus wird benötigt, um sichere und genaue Messungen zu ermöglichen.

4. TRIEBWERKSAUFBAU: VARIANTE 2

In der zweiten Variante ist die Herstellung des Brennkammerrohrs komplizierter als in der ersten. Die Probleme der thermischen Spannung sind bei dieser Variante jedoch viel geringer und lassen sich gut lösen. Dadurch können auch die Schwierigkeiten bei der Abdichtung beseitigt werden.

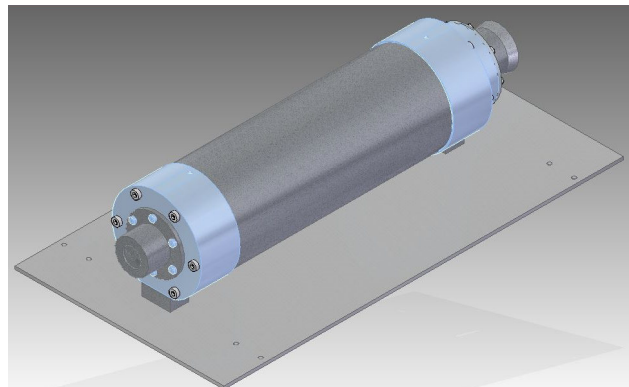


BILD 3. Variante 2 (schematische Darstellung)

Das Brennkammerrohr wird auch in dieser Variante aus einem vorgefertigten Rohr hergestellt, wie es in Kapitel 2 bereits beschrieben wurde. Da das Rohr nahtlos geschweißt ist und bereits eine gute Oberflächenqualität aufweist, entfällt eine Nachbearbeitung der Oberflächen, die bei den innenliegenden Flächen zum Teil schwierig ist. Das Rohr wird in die benötigte Länge gesägt und die Stirnflächen werden nachbearbeitet um an diesen Stellen eine glatte und ebene Oberfläche zu erhalten. Zum Befestigen der Brennkammer an den Flanschen werden

keine durchgehenden Gewindestangen verwendet. In die Flansche werden Durchgangslöcher gebohrt und in der Wand des Brennkammerrohrs werden Bohrungen mit Gewinde erzeugt. Die Gewindebohrungen sind gegenüber einfachen Bohrungen zu bevorzugen, da man keine Muttern benötigt und damit keine Auflagefläche für diese erzeugen muss, indem man das Brennkammerrohr in der Mitte auf einen kleineren Durchmesser abdreht. Dieser Vorgang würde viel Zeit in Anspruch nehmen. Die Flansche werden so auf dem Teststand montiert, dass man eine Fest-/Loslagerung erhält. Um dies zu erreichen werden auf einer Seite einer Adapterplatte normale Bohrungen und auf der anderen ein Langloch erzeugt. Dadurch kann sich die Brennkammer bei Erwärmung nicht nur frei ausdehnen, was die Problematik der thermischen Spannungen in Folge Einspannung löst, sondern es ist auch einfach möglich eine beliebige Brennkammerlänge für die Messungen zu nutzen (BILD 4).

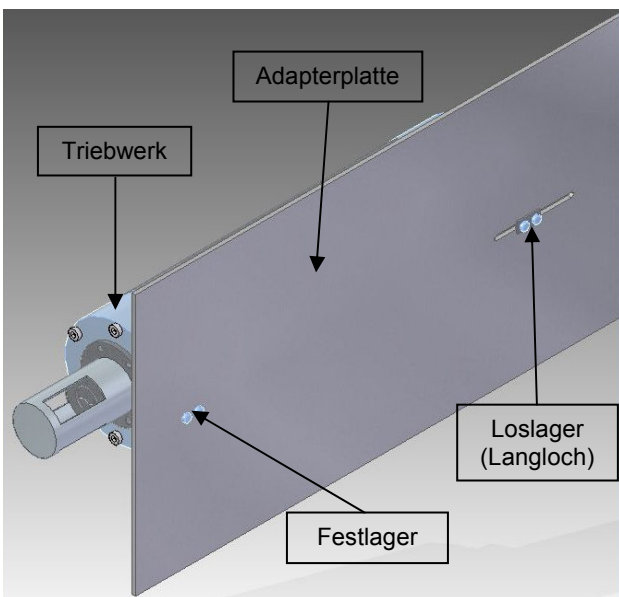


BILD 4. Fest-/Loslagerung mittels Langloch

Um das Brennkammerrohr und die Flansche, die nun nicht mehr einen quadratischen sondern einen kreisförmigen Querschnitt, mit Aussparungen für die Teststandmontage, haben, miteinander zu zentrieren, befinden sich herausstehende Lippen entlang des Außendurchmessers der Flansche. Die Flansche werden auf das Brennkammerrohr aufgesetzt und können anschließend einfacher verschraubt werden (BILD 5).

Um die Brennkammer abzudichten werden die Flansche jeweils mit einem Ring aus Graphit, welcher sich auf die gewünschte Größe zuschneiden lässt, und einem O-Ring versehen (BILD 5). Dabei wird durch Schrauben ein Anpressdruck von 60 bar (höchster Druck im Gesamtsystem) erzeugt.

Der Innendurchmesser in dieser Variante beträgt 100 mm ohne die Notwendigkeit einer Nachbearbeitung, da, wie bereits erwähnt wurde, die Rohre mit einer guten Oberflächenqualität geliefert werden. Dieser Wert kann auf Grund der Dichtungen und der Verschraubung nicht mehr als um 2 mm variiert werden. Damit kann die neue benötigte Wanddicke (Gleichung 2) berechnet werden. Diese beträgt, ohne die Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors, 0,85 mm.

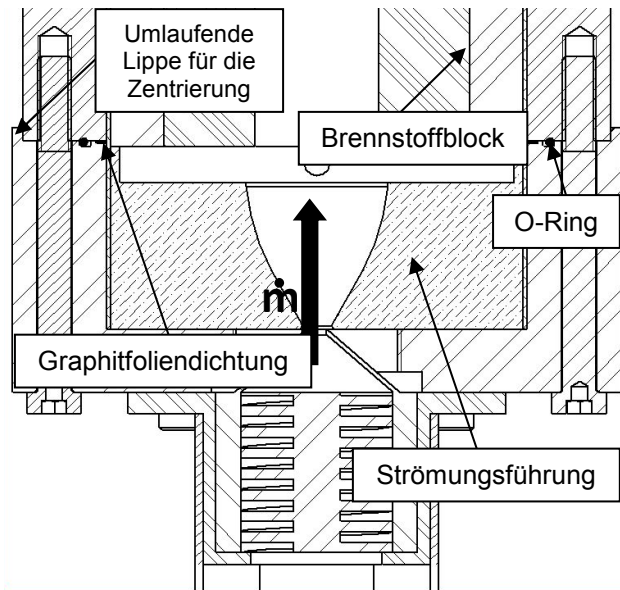


BILD 5. Zentrierung und Dichtungen am Beispiel des Injektorflanschs

Der Außendurchmesser darf den Wert von 139,5 mm nicht unterschreiten, da sonst nicht genügend Auflagefläche für die Schraubenköpfe vorhanden sein wird. Damit ergibt sich eine tatsächliche Wanddicke von 20 mm. Das bedeutet man erhält einen Sicherheitsfaktor von 23,5.

Der Aufbau ist auch in dieser Version des Triebwerks weiterhin modular. So können einzelne Elemente einfach ausgetauscht oder entfernt werden. Diese Elemente sind:

- Brennkammerrohr
- Brennstoff
- Injektor
- Strömungsführung
- Wirbelplatte
- Graphiteinsatz (für den Übergang von der Brennkammer zur Düse)
- Düse

Der Thermalschutz der Brennkammer ist ein durchgehendes Bauteil, mit einer Wanddicke von 1 mm, welches vom Düsenflansch bis zum Injektorflansch reicht. Er schließt bündig mit den inneren Flächen der Flansche ab. Den Thermalschutz auf diese Weise zu fertigen und zu montieren ist aufwändiger, als ihn aus mehreren einzelnen Teilen zu bauen, jedoch bietet er als ein einziges Bauteil eine durchgehende Abdeckung des gesamten Innenraums des Triebwerks, ohne Einschnitte oder andere Unterbrechungen. Damit soll verhindert werden, dass die Flamme an einer Stelle durch den Thermalschutz dringen und direkt auf das Metall oder die Dichtungen wirken kann. Vor Allem für die Dichtungen ist dieses Resultat wünschenswert, da sie ohne eine zu starke thermische Einwirkung nicht beschädigt oder zerstört werden und so öfter wiederverwendet werden können. Falls der Thermalschutz keine ausreichende Isolation bietet, kann seine Wanddicke und damit das Isolationsvermögen vergrößert werden. In dem Fall müssen die Bauteile im Inneren der Brennkammer angepasst bzw. ersetzt werden. Sollte die Montage des Thermalschutzes in dieser Bauweise sich als schwierig erweisen, kann er in drei Teilen gefertigt und eingebaut werden. Dabei sollten die Kontaktflächen des Brennkammerrohrs und der Flansche von ihm abgedeckt

werden.

4.1. Befestigung am Teststand

Das Triebwerk überträgt die Schubkraft auf eine Adapterplatte, die auf Linearlagern des Teststands befestigt ist. Dies soll dazu dienen, dass das Triebwerk sicher und immer auf die gleiche Stelle des Biegebalkens mit den Messinstrumenten geführt wird, um den tatsächlich erzeugten Schub präzise zu ermitteln. Damit die Einleitung der Schubkraft in den Biegebalken mittig erfolgt, muss das Triebwerk auf Verbindungselemente gestellt werden. Die Verbindungselemente heben den Triebwerksmittelpunkt auf die richtige Höhe an. Auf diese Weise kann ein beliebiger Biegebalken verwendet werden, ohne die Flansche des Triebwerks immer wieder zu überarbeiten. Der Schub belastet die Verbindungsschrauben zwischen dem Triebwerk und der Platte als Querkraft. Auch wenn der Weg bis zum Anschlag auf den Biegebalken nur sehr kurz ist bzw. das Triebwerk bereits vor dem Betriebsstart den Biegebalken berührt, sollen die Schrauben die möglicherweise auftretende Beanspruchung aushalten. Da bei der Verbindung mit einer Adapterplatte nur die Seite die als Festlager dient die Querkraft aufnehmen kann, sind nur die zwei vorderen Schrauben belastet. Der maximale Schub beträgt 3125 N, somit ist die Querkraft pro Schraube 1563 N. Im Buch Technische Mechanik von Martin Mayer [6] sind die Formeln (12)(13) zur Berechnung der maximalen Schubspannung bei einem Vollkreisquerschnitt vorhanden. Mit diesen lässt sich der Benötigte Querschnitt bestimmen.

$$(12) \quad \tau_{max} = \frac{4}{3} * \tau_m$$

$$(13) \quad \tau_m = \frac{F_Q}{A_3}$$

τ_{max} : maximale Schubspannung

τ_m : mittlere Schubspannung

A_3 : Kernquerschnitt der Schraube

F_Q : Querkraft pro Schraube

$$\tau_{max} = \tau_{tWN} = 210 \frac{N}{mm^2}$$

$$(14) \quad A_3 = \frac{4 * F_Q}{3 * \tau_{max}}$$

Aus Gleichung (14) ergibt sich der benötigte Schraubendurchmesser, für die Festigkeitsklasse 8.8, von 5 mm. Um eine höhere Sicherheit zu haben werden M6 Schrauben gewählt.

Für den Fall, dass die Linearlager wenig Spiel haben und damit die Gefahr der Verkanntung nicht besteht, gibt es eine alternative Form für die Befestigung des Triebwerks am Teststand. Dabei wird die Adapterplatte mit zwei einzelnen schmälere Platten ersetzt. Dadurch können sich die Lager hinten und vorne unabhängig voneinander bewegen. Auf diese Weise spart man an Material und die Notwendigkeit für das Langloch entfällt ebenfalls (BILD 6).

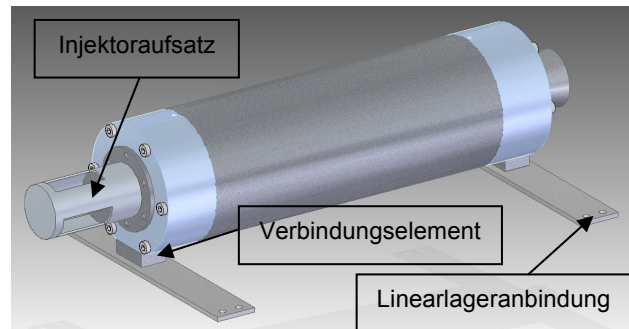


BILD 6. Triebwerk auf zwei Platten

Die Einleitung der Schubkraft in den Biegebalken kann sich als schwierig erweisen, da der Injektor über einen Schlauch mit dem Tank des Oxidationsmittels verbunden ist. Dieser Schlauch macht ein direktes Auftreffen des Triebwerks, auf der Injektorseite, auf den Biegebalken nicht möglich. Zur Lösung dieses Problems kann ein Injektoraufsatz verwendet werden (BILD 6). Der Aufsatz ist eine Hülse, die über den Injektor geschoben wird und eine oder mehrere Aussparungen beinhaltet. Diese Aussparungen müssen so groß sein, dass der Schlauch des Oxidationsmittels durch sie hindurchpasst, ohne zu knicken oder sich zu stark zu verbiegen, um den Oxidatorfluss nicht zu stören. Die Form der Aussparungen, also ob sie geschlossen oder offen sind, und ihre Anzahl können erst genau bestimmt werden, wenn die Daten des Injektors vorliegen. Dann wird es auch möglich sein die notwendigen Berechnungen, wie die Bestimmung der benötigte Wanddicke oder die Knicksicherheit, durchzuführen. Eine besondere Sicherung oder enge Toleranzen sind nicht erforderlich, da der Aufsatz durch die Schubkraft gegen das Triebwerk gedrückt wird und so sich selbst sichert. Für eine schnelle und einfache Montage ist eine Übermaßpassung zu empfehlen.

4.2. Flansche und innere Bauteile

Die Flansche dienen der Befestigung der Triebwerkselemente an einander und auch an den Teststand. Außerdem enthalten sie Bohrungen für Sensoren, die für die Messungen von Druck und unter Umständen auch Temperatur benötigt werden. Brennkammer, Düse und Injektor werden mittels Schrauben an den Flanschen befestigt.

Wie bereits erwähnt, wird im Injektorflansch, außer dem Injektor, Platz für eine Strömungsführung vorgesehen (BILD 7). Dieses Element soll dafür sorgen, dass der Oxidator, der durch den Injektor in die Brennkammer eingespritzt wird, sich gleichmäßig in Richtung des Brennstoffs verteilt. So soll verhindert werden, dass lokal mehr Brennstoff verbrennt und sich ein ungleichmäßiges Abbrandverhalten ausbildet. Die Wirksamkeit dieses Einsatzes muss experimentell ermittelt werden. Das Triebwerk kann aber auch ohne diese Strömungsführung betrieben werden, dafür muss das Brennkammerrohr um deren Länge (43,5 mm) verkürzt werden, wodurch der Brennstoffblock direkt auf dem Flansch aufliegt.

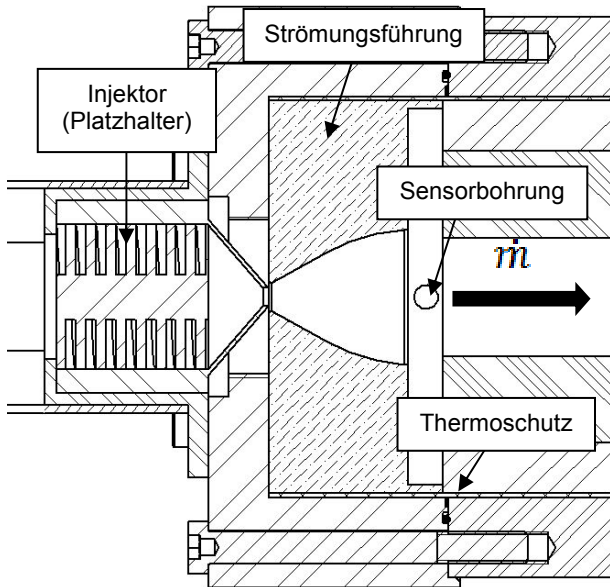


BILD 7. Schnitt durch den Injektorflansch

Da die Strömungsführung am Anfang der Brennkammer liegt, ist sie einer geringeren Temperaturbelastung ausgesetzt als die Bauteile im hinteren Teil der Brennkammer. Dennoch ist ein temperaturbeständiges Material, wie zum Beispiel Graphit, für die Fertigung zu empfehlen. Dieses Bauteil bietet für den Injektor einen zusätzlichen Schutz gegen die Hitze während des Triebwerkbetriebs.

Auch im Düsenflansch ist nicht nur Platz für die Düse, sondern noch für zwei weitere Bauteile vorgesehen (BILD 8).

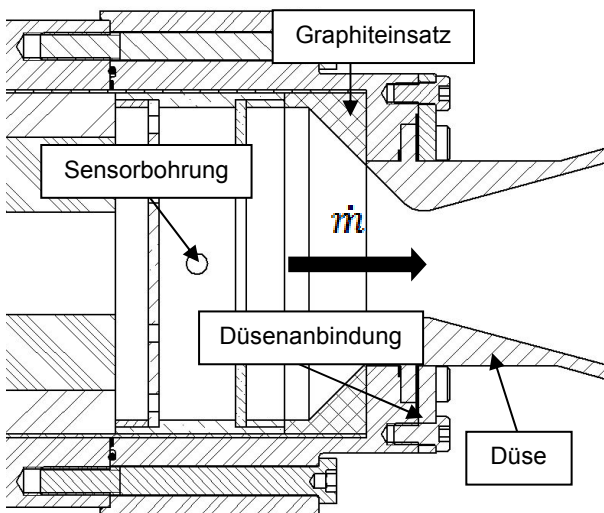


BILD 8. Schnitt durch den Düsenflansch

Eines dieser Bauteile ist die sogenannte Wirbelplatte. „Durch Mischeinrichtungen am Treibsatzende wird die geschichtete Strömung zerstört, und die Gase, herausgeschleuderte feste Partikel (Metalle) und Flüssigkeitsanteile werden verwirbelt und verbrennen. Diese Vorrichtungen werden als Misch- oder Wirbelscheiben oder -platten bezeichnet.“ Robert Schmucker [2] (BILD 9).

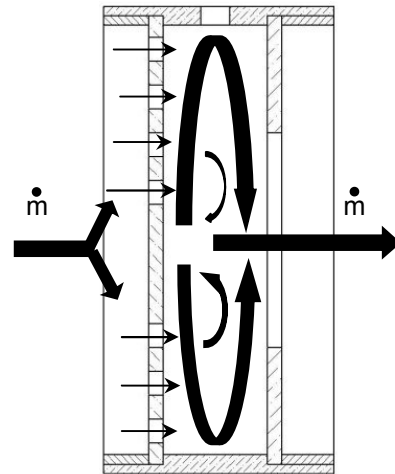


BILD 9. Verwirbelungsschema der Wirbelplatte

Die Wirksamkeit der Wirbelplatte muss experimentell ermittelt werden.

Dieses Bauteil besteht selbst aus mehreren Komponenten (BILD 10).

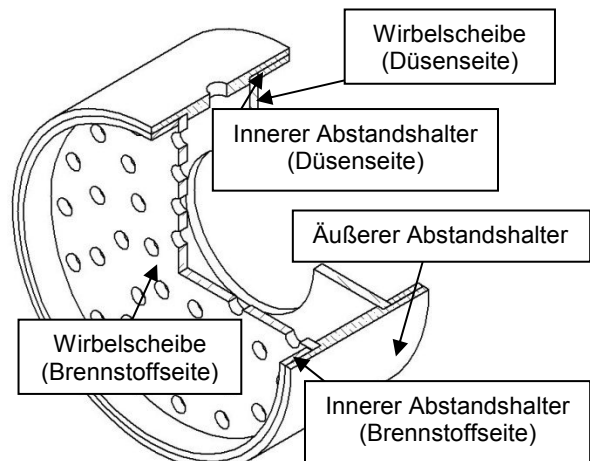


BILD 10. Dimetrische Schnittansicht der Wirbelplatte

Zum Herausfinden der optimalen Kombination lassen sich die beiden Wirbelscheiben mit Bohrungen unabhängig voneinander austauschen. Die Form und die Anzahl der Bohrungen in diesen Scheiben sind entscheidend für den Wirkungsgrad der Verbrennung (BILD 11).

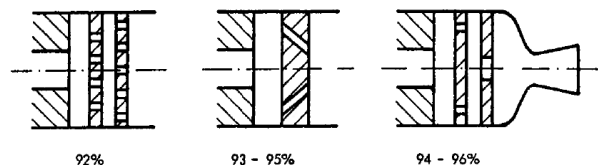


BILD 11. Einfluss des Wirbelplattenaufbaus auf den Verbrennungswirkungsgrad [2]

Die Wirbelscheibe ist extremen thermischen Belastungen ausgesetzt, da sie sich direkt in der Strömung der Verbrennungsgase befindet. Deswegen sollte das Material, das zur Fertigung verwendet wird, möglichst temperaturbeständig sein. Zu den passenden Materialien zählen unter anderen: Carbide, Keramiken bzw. faserverstärkte Keramiken und Graphit. Dieses Bauteil

lässt sich auf dieselbe Weise entfernen wie die Strömungsführung. Hier wird allerdings ein Ersatzbauteil benötigt, das weiterhin einen Raum für die Reaktion erzeugt.

Alternativ kann zur Erhöhung des Verbrennungswirkungsgrades eine perforierte Blende im Brennstoffblock, ein sogenanntes Diaphragma verwendet werden. „Es besteht aus einer perforierten Scheibe, die an einer bestimmten Stelle im Treibsatzblock senkrecht zur Kanalachse eingebaut ist“ Robert Schmucker [2] (BILD 12).

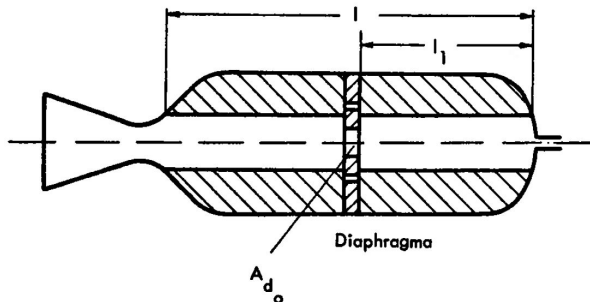


BILD 12. Schematische Darstellung eines Diaphragmas [2]

„Die Blende enthält normalerweise eine Zentralbohrung und zur Verbesserung des Ausbrandes im stromabwärtigen Teil des Brennstoffblockes einen Kranz von kleinen Bohrungen. Für eine richtige Funktion müssen folgende Bedingungen eingehalten werden:

$$A_{d_0} \geq 0,1 A_c \quad (\text{Anfangsbedingung})$$

$$A_{d_1} \leq 6,5 A_c \quad (\text{Endbedingung})$$

$$0,15 l \leq l_1 \leq 0,5 l$$

Dabei bezeichnet A_{d0} und A_{d1} den Anfangs- und den Endquerschnitt aller Bohrungen, die jeweils im Kanal liegen, l_1 steht für die Treibsatzlänge oberhalb des Diaphragmas.“ Robert Schmucker [2]. Damit das Triebwerk richtig funktioniert, sind nicht nur die Abmessungen der Blende entscheidend, sondern auch ihre Position im Triebwerk. Wenn das Diaphragma zu nah am Injektor aufgestellt wird, führen die heißen Gase zu einer falschen Abtragung des Brennstoffs im unteren Teil. Wenn es aber zu nah an die Düse positioniert wird, sind, laut Schmucker [2], die Gase zu brennstoffreich und tragen ebenfalls nicht die gewünschte Menge an Brennstoff ab. Der Steg zwischen den einzelnen Bohrungen soll größer als ihr Durchmesser sein. Die Geometrie und optimale Position des Diaphragmas im Triebwerk müssen experimentell bestimmt werden.

4.3. Reaktionskammer

Wie in Kapitel 2 bereits erklärt wurde, ist der Begriff Brennkammer nicht ganz zutreffend, da hier nicht nur die Verbrennungsreaktion stattfindet, sondern auch der Treibstoffblock untergebracht ist. Deswegen wird der Raum indem die Verbrennung stattfindet ab jetzt als Reaktionskammer bezeichnet.

„Der Verbrennungswirkungsgrad in einem Hybridtriebwerk ist wegen des geschichteten Aufbaus der Kanalströmung

niedrig. Es müssen deshalb vor allem bei Einkanal-anordnungen zusätzliche Einrichtungen vorhanden sein, die eine Vermischung des Gasstroms erzwingen und zu einer (fast) vollständigen Reaktion von Oxidator und Brennstoff führen.“ Robert Schmucker [2]. Im vorhergehenden Kapitel wurden zwei mögliche Einrichtungen, Wirbelplatte und Diaphragma, erläutert. Eine Reaktionskammer ist in beiden Fällen notwendig, wobei die Wirbelplatte sich bereits in der Reaktionskammer befindet. Eine wichtige Größe der Reaktionskammer ist die charakteristische Länge. Zu ihrer Bestimmung ist man, genau wie bei Flüssigkeitstriebwerken, auf experimentelle Messreihen angewiesen, sagt Schmucker [2]. Das ist auch eine der Hauptaufgaben der Versuche mit diesem Testtriebwerk. Zur Feststellung der bestmöglichen charakteristischen Länge werden Reaktionskammern verschiedener Längen, bei sonst gleichen Randbedingungen (Mischungsverhältnis, Treibstoff, Brennkammerdruck etc.), eingesetzt und die Auswirkung auf den Verbrennungswirkungsgrad gemessen. Die einfachste Möglichkeit dafür ist die Messung der Schubkraft. Ein niedrigerer Verbrennungswirkungsgrad erzeugt weniger Schub und ein hoher mehr. Die Geometrie der Reaktionskammer soll möglichst einfach sein. Deswegen ist sie ein einfacher Zylinder, mit einem konischen Übergang zur Düse. Dieser Übergang ist in BILD 8 unter dem Namen Graphiteinsatz dargestellt. Auf diese Weise kann der Übergang unabhängig vom vorhergehenden Teil (einfacher Zylinder oder Wirbelplatte) ausgetauscht werden und die beste Konussteigung ermittelt werden, denn bei diesem Teil liegt, nach Schmucker [2], die Steigung des Konus zwischen 30° und 45°.

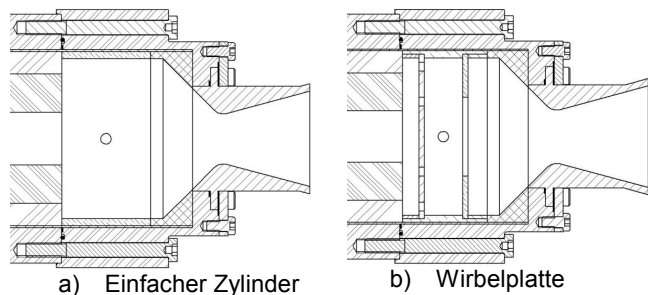


BILD 13. Beispiel für verschiedene Reaktionskammern

Für jede Messung bzw. Längenänderung der Reaktionskammer wird ein neues Brennkammerrohr benötigt und das vorherige muss mit dem neuen Rohr ersetzt werden, was zusätzlich einen hohen Montageaufwand bedeutet. Hier kommt die Einfachheit der Geometrie des Brennkammerrohrs und des gesamten Triebwerksaufbaus zur Geltung.

5. KÜHLUNG

Es gibt fünf unterschiedliche Kühlmethoden. Diese sind:

- Regenerative Kühlung
- Filmkühlung
- Strahlungskühlung
- Kapazitive Kühlung

- Ablative Kühlung

Bei der regenerativen Kühlung wird flüssiger Treibstoff durch Kanäle in den Wänden der Düse und der Brennkammer geleitet, bevor er in die Brennkammer eingespritzt wird. Die Wärmeenergie der Wände wird in den Treibstoff abgeführt und erwärmt diesen. Am häufigsten wird dafür das so genannte Gegenstromverfahren verwendet (BILD 14).

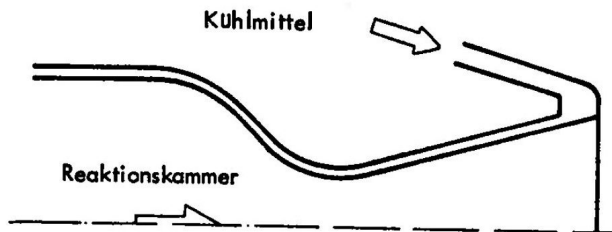


BILD 14. Prinzip des Gegenstromverfahrens bei regenerativer Kühlung [2]

Da der Treibstoff von der Düse in Richtung des Injektors läuft, ist seine Temperatur an der Düse, wo die größte thermische Belastung auftritt, am geringsten. Würde man den flüssigen Treibstoff von der anderen Seite in die Wände leiten, wäre dieser bereits stark erwärmt noch bevor er die Düse erreicht und die Kühlung wäre weniger wirkungsvoll. Die Fertigung der Triebwerkskomponenten ist bei dieser Kühlmethode wegen der Kühlkanäle (BILD 15) in den Wänden sehr aufwändig. Damit ist diese Methode für das HyER EM Triebwerk nicht zu gebrauchen. [2]

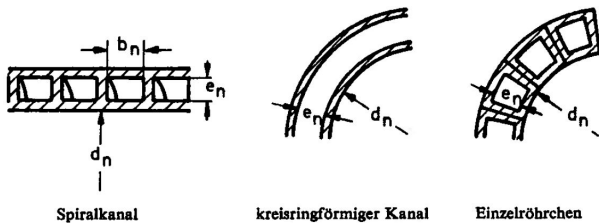


BILD 15. Beispiele für Kühlkanalformen [2]

Für die Filmkühlung werden kleine Bohrungen entlang der Innenflächen der Brennkammer, die gekühlt werden sollen, gebohrt. Durch diese Bohrungen tritt der flüssige Treibstoff langsam aus und erzeugt einen gleichmäßigen, Schutzfilm über der Oberfläche. Auch diese Methode hat einen erheblichen Fertigungsaufwand, was sie ungeeignet macht. [2]

Bei der Strahlungskühlung wird die Wärme in Form von Strahlung an die Umgebung abgegeben. Um eine reine Strahlungskühlung zu benutzen, werden hochtemperaturbeständige Materialien benötigt. Diese Kühlungsart kommt in allen Komponenten des Triebwerks vor, ist aber sehr schwach, vor allem in der Nähe von Körpern die selbst Wärme ausstrahlen (zum Beispiel: Erde) [2].

Bei der kapazitiven Kühlung wird Wärmeenergie nicht abgeführt, sondern von dem Material aufgenommen und gespeichert. Diese Methode ist sehr einfach. Hier zeigt sich der Vorteil den die höhere Wanddicke des Brennkammerrohrs mit sich bringt. [2]

Die ablativ Kühlung erfolgt durch Materialabtragung der

Komponenten. An den thermisch am höchsten beanspruchten Stellen wird das Material so stark erwärmt, dass es an der Oberfläche aufschmilzt oder sogar zum Teil verdampft. So wird ein Teil der Wärmeenergie abgeführt. Durch die Abtragung ändert sich die Geometrie eines Bauteils, was besonders am Düsenhals unerwünscht ist. Durch Verwendung von hochtemperaturbeständigen Materialien kann die Abtragung reduziert werden. Man kann auch nur eine Beschichtung aus diesen Materialien auftragen, sollte dabei aber die möglicherweise stark unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten beachten. [2] Im HyER EM soll die Innenfläche der Düse mit einer Schutzschicht aus Graphit ausgestattet werden. Damit ist nicht nur eine höhere Temperaturbeständigkeit gewährleistet, sondern man kann die Düse „reparieren“. Wenn sie stellenweise abgetragen wird, muss nicht die gesamte Düse neu gefertigt werden, es sollte genügen die Reste der alten Graphitschicht zu entfernen und eine neue Schicht aufzutragen. Dadurch sollte es möglich sein Zeit und Material zu sparen, da so nach jedem Triebwerkslauf keine neue Düse benötigt wird.

6. FAZIT

Das Einspannen der Brennkammer zwischen zwei Flanschen mit Hilfe von Gewindestangen, zeigt sich als ungünstig. Nicht nur wegen der thermischen Spannungen, die das Material stark beanspruchen, sondern auch wegen der schwierigen Abdichtung. Die hohe Anzahl an Gewindestangen bzw. sehr große Gewindestangen würden den Aufbau zusätzlich sehr unhandlich machen und die Anbindung an den Teststand erschweren. Jedoch kann durch den Einsatz eines nicht metallischen Brennkammerrohrs dieser Aufbauvariante verwendet werden. Wenn man Kunststoffe, die einen sehr kleinen Wärmeausdehnungskoeffizienten haben, verwendet, kann man den Brennstoff gleichzeitig als Brennkammerrohr verwenden. Dabei ist auf eine ausreichende Festigkeit des verwendeten Materials zu achten. Durch das Entfallen der Thermospannungen kann der Querschnitt vergrößert werden, damit ausreichend Brennstoff für den Betrieb vorhanden ist und man eine größere Fläche hat, um eventuell Dichtungen unterzubringen. Bei der Wahl eines transparenten Werkstoffes, wie zum Beispiel Polymethylmethacrylat (PMMA), bekannt auch unter der Bezeichnung Plexiglas, wäre man in der Lage während des Betriebs in das Innere des Triebwerks einzusehen und so den Verbrennungsprozess zu beobachten. Da das Triebwerk HyER EM in Metallbauweise ausgeführt werden soll, können die Kunststoffe nicht verwendet werden.

Somit muss das Triebwerk in Variante zwei ausgeführt werden. Daraus ergibt sich, dass die Brennkammer kein einfaches Rohr sein kann. Sie muss mit Gewindebohrungen versehen werden, um die Flansche mit dem Brennkammerrohr verbinden zu können. Für die Gewindebohrungen muss eine ausreichend große Wanddicke vorhanden sein, welche ein Vielfaches der benötigten Wanddicke ist. Das hat aber auch Vorteile für die Festigkeit des Bauteils, die Abdichtung und die kapazitive Kühlung durch Wärmespeicherung in der Brennkammerrohrmasse. Um den Bearbeitungsaufwand so gering wie möglich zu halten wurde ein Brennkammerrohr gewählt, welches bereits mit hoher

Oberflächenqualität und den passenden Abmessungen geliefert wird. Die Nuten für die Dichtungen werden in die Flansche eingearbeitet, womit dieser Bearbeitungsschritt nur einmal für alle Brennkammerlängen durchgeführt werden muss. Durch den modularen Triebwerksaufbau sind das Brennkammerrohr, die Düse, der Injektor, sowie die innenliegenden Bauteile wie die Strömungsführung und Wirbelscheibe, leicht austauschbar. Es ist möglich jeweils nur eine Seite separat auszuwechseln. Dieser Vorteil kann in der Realität nicht genutzt werden, da alle Dichtungen und Bauteile nach jedem Betrieb auf Schäden und Abnutzung untersucht werden müssen, wofür das gesamte Triebwerk demontiert werden muss. Zur Befestigung am Teststand wird das Triebwerk auf eine Adapterplatte festgeschraubt. Der Aufbau wird dann auf den Linearlagern befestigt. Bei guten Lagern kann die Adapterplatte durch zwei einzelne Platten ersetzt werden, was wiederum Material und Bearbeitungsaufwand spart. Die Sensoren für Druck und eventuell auch Temperaturmessungen werden in den dafür vorgesehenen Bohrungen in den Flanschen untergebracht. Für eine präzise Schubkraftmessung muss das Triebwerk den Biegebalken in einer bestimmten Höhe mittig treffen. Damit man einen beliebigen Biegebalken verwenden kann, lässt sich das Triebwerk mit Hilfe von Verbindungsteilen in der Höhe verstellen. Der Thermalschutz im Inneren des Triebwerks besteht aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Die anderen Bauteile im Inneren, außer dem Brennstoffblock, sollen aus einem thermisch beständigen Material, wie zum Beispiel Keramik oder Graphit, gefertigt werden. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient möglichst klein ist, damit keine zusätzlichen Spannungen, die die Bauteile beschädigen oder zerstören können, während des Betriebs auftreten.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR):
http://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-6978/11527_read-26906/
letzter Zugriff: 28.03.2013, 14:38
- [2] Schmucker, R.: Hybridrakentriebwerke,
München: Wilhelm Goldmann Verlag 1972
- [3] Mayr, T.; Thull D.; Strasser T.: Fachbericht
„Auslegung eines funktionsfähigen Raketen-
triebwerks in Hybrid-Bauweise“ und Matlab-
Programm, Augsburg, 06.06.2012
- [4] Wittel H.; Muhs D.; Jannasch D.; Voßiek J.:
Roloff/Matek Maschinenelemente, Tabellenbuch
19. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teuber, GWV
Fachverlage GmbH 2009
- [5] Wittel H.; Muhs D.; Jannasch D.; Voßiek J.:
Roloff/Matek Maschinenelemente,
Formelsammlung
9. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teuber, GWV
Fachverlage GmbH, 2008
- [6] Mayr M.: Technische Mechanik
6. Auflage, München, Wien: Carl Hanser Verlag
2008
- [7] Ellerbeck M.: Grundlagen der Raumfahrt,
Vorlesungsskriptum, Hochschule Augsburg WS
2012/13
- [8] NASA Glenn Research Center: Chemical Equilibrium
with Applications (CEA)
<http://www.grc.nasa.gov/WWW/CEAWeb/>
letzter Zugriff: 28.03.2013, 15:14
- [9] Dichtelemente arcus GmbH:
<http://www.o-ring.de/html/de/produkte/o-ring-o-ringe/>
letzter Zugriff: 28.03.2013, 15:28
- [10] <http://www.bernd-leitenberger.de/triebwerke.shtml>
letzter Zugriff: 28.03.2013, 15:40
- [11] SGL Group The Carbon Company,
[http://www.sglgroup.com/cms/international/products/
product-groups/eg/sigraflex-graphite-
foil/index.html?__locale=de](http://www.sglgroup.com/cms/international/products/product-groups/eg/sigraflex-graphite-foil/index.html?__locale=de)
letzter Zugriff: 25.03.2013, 14:20
- [12] <http://de.wikipedia.org/wiki/Baustahl>
letzter Zugriff: 16.12.2012, 17:15