



Hybridmotoren

Tom

13. November 2005

1 Einführung

Was einen Hybrid-Motor als solchen kennzeichnet ist der Aggregatzustand, in der die beiden für die Verbrennung notwendigen Antriebsstoffe, Treibstoff und Oxidator, vorliegen. Während es sich bei den aller meisten Raketenmotoren im Modellbaubereich um so genannte Feststoffmotoren handelt, d.h. sowohl der Treibstoff, als auch der Oxidator liegen in einer festen Form direkt innerhalb der Brennkammer vor, besitzt bei einem Hybrid-Antrieb eine der beiden Antriebsstoffe eine flüssige oder auch gasförmige und der andere eine feste Form. Man spricht von einem "hybriden" Antrieb, wenn der Treibstoff als fester Stoff in der Brennkammer vorliegt und der Oxidator in flüssiger Form hinzu gegeben werden muss. Liegen beide Stoffe in umgekehrter Form vor, d.h. der Oxidator ist fest und der Treibstoff flüssig, so spricht man hingegen von einem "inversen Hybriden".

2 Aufbau

Ein Hybrid-Motor besteht prinzipiell aus mindestens vier Teilen: dem Tank, dem Injektor (d.h. der Einspritzkopf), der Brennkammer und der Düse.



Den größten Unterschied zu einem Feststoffmotor stellt wohl der Tank dar. Während bei einem Feststoffmotor keiner der beiden Antriebsstoffe transportiert werden muss, denn sie lagern ja bereits zum Zeitpunkt des Abbrandes in der Brennkammer, ist es bei einem Hybriden hingegen notwendig den flüssigen Teil getrennt aufzubewahren und erst während des Betriebs der Brennkammer kontinuierlich zuzuführen. Alle im Modellbau kommerziell erhältlichen Hybrid-Systeme lagern in ihrem Tank flüssiges Distickstoffmonoxid (techn. Lachgas bzw. N_2O). Flüssiges Lachgas bietet den Vorteil, dass man seinen Eigendruck von ca. 50 bar (bei Zimmertemperatur) zur Förderung in die Brennkammer nutzen kann. Andere Oxidatoren (Ausnahme z.B. Sauerstoff) bedürfen hierbei meist einer externen Druckbeaufschlagung wodurch ein weiterer Drucktank notwendig wird. Des Weiteren ist Lachgas einer der wenigen Oxidatoren, die für Modellbauer ohne größere Hürden erwerblich und auch handhabbar sind.

Direkt an den Oxidator-Tank angeschlossen stellt der Injektor die Verbindung zur Brennkammer dar. Wer jedoch meint dieser Teil des Motors sei nicht der Erwähnung wert der irrt, hat der Injektor doch als Aufgabe den Oxidatorstrom erst im Moment der Motorenzündung frei zu geben und durch seine Form für eine best mögliche Verteilung des Oxidators im Brennraum zu sorgen. Wie der Injektor ersteres bewerkstelligt hängt vom Hybrid-System ab und wird hier an späterer Stelle näher erläutert. Wie sehr die Gesamtleistung des Motors auch von der Form des Injektors abhängt zeigt sich schön bei dem von der Firma RATTWorks vertriebenen System. Hier wird der spezifische Impuls eines K240 Motors durch Ersetzen des Standard-Injektors durch einen speziell angepassten Injektors von 145 Sekunden auf 205 Sekunden gesteigert.

Auf den Injektor folgt die Brennkammer. In ihr lagert bereits der feste Treibstoff, was im Falle der kommerziellen Hybrid-Systeme meist ein Kunststoff (PMMA (Acrylglas), PE, PP, PB oder auch PVC) ist. Während bei Feststoffmotoren der Treibstoff normalerweise selbst in einer Phenolharz- oder auch Papp-Hülse lagert, die als Hitzeschild für die aus einer Aluminiumlegierung bestehende Brennkammerwand gegenüber der im Inneren herrschenden Temperatur gedacht ist, fehlt diese in Hybridmotoren gänzlich. Der Grund hierfür ist die Tatsache, dass eine Verbrennung nur dort stattfinden kann wo Treibstoff und Oxidator direkt auf einander treffen, was bei Feststoff-Motoren jede für die Abbrand-Flamme erreichbare Oberfläche bedeutet wo hingegen bei Hybriden

ein direkter Kontakt der beiden reagierenden Stoffe, gelenkt durch den Injektor, nur an der Innenwandung des Treibstoffblocks statt findet. Nach außen, also Richtung Brennkammerwand dient der Treibstoff dann selbst noch als Isolator, da er die Hitzestrahlung nur allmählich durch lässt. Dies ist für die maximal 12 Sekunden brennenden Motoren vollkommen ausreichend.

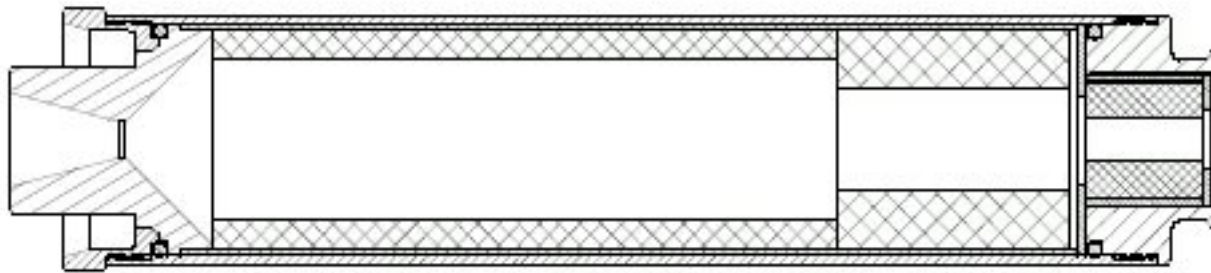
Abgeschlossen wird die Brennkammer durch die Expansionsdüse, die, wie in jedem anderen Raketenmotor auch, für die eigentliche Schuberzeugung zuständig ist. Je nach Hybridsystem kommen hier Stoffe wie Graphit, Stahl oder auch Bakelit zum Einsatz, je nach System muss diese jedoch vor jedem Start ersetzt werden.

3 Funktionsweise

Bevor ein Hybridmotor, betrieben mit Lachgas und Kunststoff gezündet werden kann muss das Innere der Brennkammer zuerst aufgeheizt werden. Dies hat zwei Gründe: Zum einen spaltet sich erst bei ca. 500° C das Lachgas in seine Bestandteile Stickstoff und Sauerstoff auf und zum anderen beginnt der Kunststoff zu verdampfen. Erreicht wird dies je nach Hybrid-System durch das Entzünden einer kleinen Menge Fest-Treibstoff (Composit, Schwarzpulver, usw.) im Inneren der Brennkammer oder durch das Entzünden einer in die Brennkammer eingeführten Bogenlampe welche mit reinem Sauerstoff geflutet ist. Das letztgenannte Verfahren wird auch als "pyrotechnisch freie Zündung" oder kurz "pyro-free" bezeichnet und unterliegt NICHT dem Sprengstoffgesetz. Nach der Zündung, meist mittels Durchbrennen eines Stückes Kunststoffschlauch, gibt der Injektor den Weg für das Lachgas frei. Bedingt durch die dort herrschende Temperatur beginnt das Lachgas sich zu zersetzen und seine Einzelteile reagieren mit dem gasförmig gewordenen Kunststoff. Es kommt zu einer Verbrennung, deren Resultat noch mehr Hitze und leichte Gasmoleküle ist. Während die erzeugte Hitze zum einen weiter dafür sorgt, dass der Kunststoff verdampft und die Brennkammer unter hohem Druck gehalten wird, stellen die Gasmoleküle das Arbeitsmedium dar, mit dessen Hilfe die Düse schließlich ihren Schub erzeugt. An dieser Stelle kommen wir zu einem weiteren Vorteil der Hybridmotoren. Bedingt durch den Dampfdruck des Lachgases von ca. 50 bar ist es unmöglich, dass in der Brennkammer ein Druck von größer 50 bar entstehen kann. Warum? Nun, der Brennkammerdruck stellt ein Gegengewicht zu dem im Tank herrschenden Druck dar, denn nur durch die Druckdifferenz zwischen Tank und Brennkammer beginnt das Lachgas in Richtung Brennkammer zu fließen. Mit steigendem Druck und somit verringernder Druckdifferenz zwischen Brennkammer und Oxidator-Drucktank, fließt immer weniger Lachgas aus dem Tank, welches jedoch gebraucht wird um die Verbrennung im Inneren der Brennkammer aufrechtzuerhalten. Die Leistung des Motors, d.h. auch sein Brennkammerdruck, sinkt. Dies hat jedoch zu Folge, dass wieder mehr Lachgas in die Brennkammer gelangt. Wie man sieht regelt sich das System selbst auf einen Arbeitsdruck kleiner 50 bar. Im Gegensatz dazu wird ein Feststoff-Motor alleine dadurch geregelt wie viel Oberfläche der Abbrand-Flamme ausgesetzt wird. Dieser Effekt verstärkt sich je nach Treibstoff-Typ zusätzlich durch die herrschende Temperatur und Druck. Im Normalfall ist dies kein Thema, der zu erwartende Druck kann anhand der Treibstoff-Geometrie errechnet und die Motoren-Gehäuse auf die dabei entstehenden Kräfte ausgelegt werden. Kommt es jedoch im Inneren des Treibstoff-Blocks zu einem Riss, Poren oder Lunken, z.B. bedingt durch mechanische Belastung (z.B. das versehentliche Fallen lassen des Treibstoffblocks), unsaubere Herstellung oder falsche Lagerung, entstehen so genannte HotSpots, eine schlagartig größer werdende Abbrandfläche. Der dabei unerwartet und unkontrolliert ansteigende Druck bringt dann meist das Motoren-Gehäuse von Feststoff-Motoren zum Bersten.

4 Verfügbare Systeme - Aerotech, MicroHybrid

Bei dem Hybrid-System der Firma Aerotech handelt es sich um ein RMS-Gehäuse, wie es auch für die Feststoff-Antriebe verwendet wird. Es wird lediglich ein Drucktrank benötigt, der auf dem bestehenden Gehäuse montiert werden muss. Ein Stück Fest-Treibstoff versperrt den Weg für das Lachgas und dient dazu die Brennkammer vorzuheizen. Als Treibstoff kommt bei diesem Motor Zellulose zum Einsatz. Der Vorteil dieses Systems liegt darin, dass das Gehäuse sowohl für Hybrid, als auch Feststoff, verwendet werden kann. Der Hersteller bietet außerdem eine Palette an Tanks, Injektoren und Treibstoffen an, die sich fast beliebig kombinieren lassen um so die gewünschte Motorenleistung und Brenndauer zu erhalten.



Der MicroHybrid wird nicht direkt von einer Firma hergestellt sondern ist mehr ein Synonym für einen sehr kleinen und sehr einfachen Motor, angetrieben durch das Lachgas einer Sahnespender-Patrone. Diese wird vor dem Flug in den Motor geschraubt, ein Dorn zersticht die Metallmembran und der Motor steht unter Druck. Als Treibstoff können viele verschiedene Stoffe dienen, am gebräuchlichsten sind Grains (Treibstoffblöcke —> siehe Glossar) aus Papier oder Epoxydharz da sie leicht zu bearbeiten sind. Aber auch PE, Polyamid, Wachs, etc.... können verwendet werden. Im Internet sind zwei Hersteller zu finden, bei denen man den MicroHybrid als Bausatz oder komplett fertig erwerben kann.

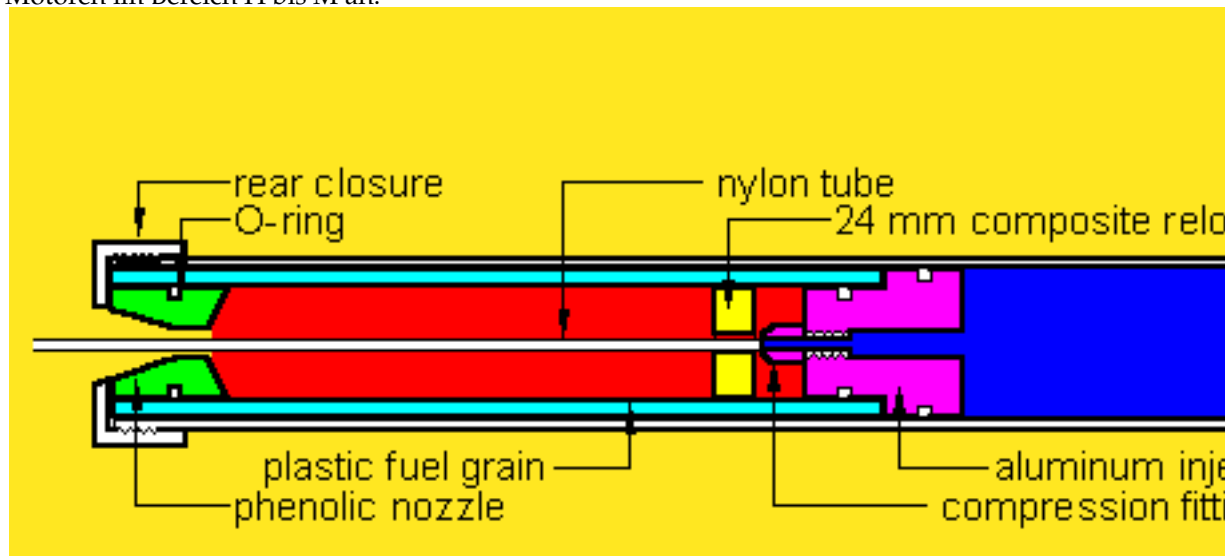
Der Nachteil beider Systeme ist die Tatsache, dass die Kapsel vor dem Start von Hand angestochen werden muss. Bei den im Tank herrschenden 60 bar Druck ein nicht ganz ungefährliches Unterfangen, da der Tank undicht werden könnte und somit -80°C kaltes N₂O austritt. Jedoch kommt das nur sehr selten vor und durch die Bauweise kann man sich keine Verbrennungen (durch die extreme Kälte) zuziehen. Die beiden nun folgenden Hybrid-Systeme hingegen erlauben das Betanken des Motors aus sicherer Entfernung.



5 Verfügbare Systeme - Monotubes

Monotube-Motoren bestehen, in Anlehnung an den Namen, aus einem einzigen Rohr. Nach oben ist das Rohr durch einen Schraubverschluss luftdicht abgeschlossen, in das untere Ende kann die Düse aus Graphit eingeschraubt werden. Um nun das Rohr in den Bereich der Brennkammer und in den Bereich des Lachgas-Tanks aufzuteilen kommt ein kleiner Kolben zum Einsatz, der gleichzeitig noch als Injektor fungiert. Zur Betankung des Hybriden wird ein Nylon-Schlauch mit dem Kolben verschraubt und durch Brennkammer und Düse ins Freie in Richtung Gas-Flasche geführt. In dem Raum zwischen Treibstoffblock und Betankungsschlauch wird noch kleine Feststoff-Ladung samt Elektrozünder platziert, dessen Kabel ebenfalls durch die Düse ihren Weg ins Freie finden. Fertig präpariert wird die Rakete nun auf die Startrampe gestellt, der Betankungsschlauch und der Elektrozünder angeschlossen. Das Befüllen des Motors kann nun durch Aktivieren des Ventils der Lachgas-Flasche beginnen. Zur Entlüftung und zur Anzeige ob der Tank komplett befüllt ist, besitzt der obere Verschluss eine winzige Bohrung die geringe Mengen Lachgas entweichen lässt. Ist der Tank voll, so beginnt weißer Rauch (verdampfendes Lachgas) aus der Rakete zu entweichen. Nun kann man durch Entzünden des Feststoffes den Motor vorheizen. Da der Betankungsschlauch direkt am nun brennenden Feststoff-Block vorbei geht beginnt dieser zu schmelzen und gibt nach kurzer Zeit das Lachgas frei.

Dieses System ist recht einfach in seiner Handhabung und die Kosten für die Anschaffung der benötigten Betankungs- & Zündanlage (Schläuche und Ventile zum Betanken des Motors, im englischen auch "Ground Support Equipment" oder kurz GSE genannt) sind moderat. Die Hersteller bieten eine gute Auswahl an Motoren im Bereich H bis M an.



6 Verfügbare Systeme - HyperTEK

Dieses sehr interessante System wird von der Firma HyperTEK hergestellt. Dabei ist das ganze sehr modular aufgebaut und besteht aus dem Treibstoffblock, der Injektor-Glocke und dem Drucktank. Eine besondere Beachtung gibt den Treibstoffblöcken, denn sie sind Treibstoff, Brennkammer und Düse in einem. Hergestellt aus einem hitzebeständigeren Kunststoff kann ein solcher Treibstoff-Block bis zu zweimal verwendet werden. Um den Motor zu zünden wird die präparierte Rakete auf der Startrampe mittels Kabelbinder auf eine Betankungs- & Zündanlage geschnallt. Diese ragt mit einem Füllrohr bis zum Injektor und dient dazu den Tank des auf der Startrampe stehenden Motors aus sicherer Entfernung zu befüllen. Durch eine zweite Öffnung kann reiner Sauerstoff in die Brennkammer gelangen. Nach befüllen des Tanks wird zuerst eine Sauerstoffatmosphäre in der Brennkammer erzeugt und anschließend durch zwei Elektroden ein kleiner Lichtbogen gezündet. Dieser lässt, bedingt durch den Sauerstoff, den umliegenden Treibstoff-Block in Flammen aufgehen was die Brennkammer aufheizt. Kurz darauf schmelzen die Kabelbinder, mit denen der Motor fest auf der Betankungsanlage sitzt, das Füllrohr springt vom Injektor und das Lachgas beginnt die Verbrennung weiter zu versorgen.

In Abhängigkeit davon wie man den Treibstoffblock, den Injektor und den Tank wählt ist es möglich die Leistung und Brenndauer seines Motors zu beeinflussen. Der Hersteller bietet hierzu eine große Palette an Teilen an, mit denen sich Motoren mit bis zu 2000 N Durchschnittsschub, 10000 Ns Gesamtleistung oder 13 Sekunden Brenndauer konfigurieren lassen. Der Vorteil dieses Systems liegt darin das es sehr variabel ist. Leider sprechen die Anschaffungskosten für die Betankungs- & Zündanlage nicht gerade für sich.



7 Vorteile, Nachteile und Wissenswertes

Die Vorteile eines Hybrid-Motors sind ein hoher Kosten/Nutzen-Faktor, die hohe Betriebssicherheit. Da bei Hybriden der Treibstoff lediglich aus einem geformten Kunststoffrohr hergestellt ist und für den nächsten Start nur einige kleinere Teile wie Füllschlauch, Dichtungsringe oder die Düse ersetzt werden muss sind die entstehenden Kosten für eine Wiederladung des Motors im Vergleich zu seiner Leistung außerordentlich gering. Das Wiederladen eines Motors der Leistungsklasse I steht mit ca. 16,- € (Stand: 18.11.2004) in keinem Vergleich zu den am Markt erhältlichen Feststoff-Motoren. Da bis zum Zeitpunkt des Zündens beide reaktiven Treibstoff-Komponenten getrennt gelagert sind, kann es zu keiner spontanen Entzündung des Motors kommen. Darüber hinaus verfügen die meisten Hybriden über die Möglichkeit den Motor erst im letzten Moment, sprich wenn das Modell schon auf der Startrampe steht, aus sicherer Entfernung zu betanken und zu zünden. Die meisten Hybrid-Motoren besitzen eine längliche schlanke Form und der Großteil ihres Gewichtes beschränkt sich auf den Tank, der immer am oberen Ende sitzt. Der somit stark nach oben verlagerte Schwerpunkt erlaubt es auch Modelle zu fliegen, die, mit einem Feststoff-Motor geflogen, durch Gewichte in der Spitze stabilisiert werden müsste.

Die Nachteile eines solchen Systems sind die hohen Anschaffungskosten für Gehäuse sowie Zünd/Betankungs-Anlage, die komplexe Handhabung der Motoren und die relativ schweren Motoren-Gehäuse sowie die Schwierigkeit derartige Motoren als Oberstufen-Antriebe einer Mehrstufigen Rakete (Staging) bzw. gebündelt (Clustering) zu verwenden. So niedrig die Preise für die Treibsätze sind, so hoch ist der Preis für die anfängliche Beschaffung des Motor-Gehäuses, der Betankungs- & Zündanlage und die Anmietung oder den Erwerb einer Gasflasche für die Lagerung und den Transport des Lachgases. Der Kauf eines Hybrid-Systems sollte gut überlegt sein, ist er doch mit einer ganzen Reihe von Kosten verbunden, was sich jedoch rentiert, beabsichtigt man damit eine Vielzahl von Flügen zu tätigen. Auch sollte nicht unterschätzt werden, dass die Handhabung eines solchen Motors nur zum Teil mit der eines Feststoff-Motors verglichen werden kann, ist sein Zusammenbau für den Start sowie die Pflege nach einem erfolgreichen Flug doch um einiges aufwendiger und verlangt vom Betreiber etwas Geschick und Wissen. Ein solcher Motor kann meist nur alleine in einem Raketenmodell geflogen werden, da eine synchrone Zündung eines Motorclusters aus Hybrid-Motoren außerordentlich schwierig ist. Das Vorhaben einen solchen Antrieb in der Oberstufe einer mehrstufigen Rakete zu verwenden stellt an dieser Stelle ein noch viel problematischeres Unterfangen dar, denn mit Ausnahme des MicroHybriden und der Aerotech Hybriden sind alle Hybrid-Systeme bis zum Zeitpunkt ihrer Zündung mit der Betankungs- & Zündanlage verbunden und verfügen über eine Entlüftungsöffnung in ihrem Tank, durch die permanent geringe Mengen an Lachgas entweichen können. Worauf auch hingewiesen werden sollte ist die Tatsache, dass Hybrid-Motoren außerordentlich "wetterfühlilig" sind. Der Dampfdruck des Lachgases, somit der Druck für die Lachgasförderung und auch der Brennkammerdruck hängen stark von der Umgebungstemperatur ab. Mit sinkenden Umgebungstemperaturen sinkt der Druck des flüssigen Lachgases und somit letztlich auch die Leistung des gesamten Antriebssystems, wohingegen die Brenndauer steigt. Hierdurch können schnell die Einsatzgrenzen

der verwendeten Materialien für die Brennkammer und Düse erreicht werden, was in Deformation und Anschmelzungen enden bzw. letztendlich bis zum Durchbrennen der Brennkammer resultieren kann. Im umgekehrten Fall steigt in einem befüllten und der prallen Sommersonne ausgesetzten Lachgas-Tank der Dampfdruck, wodurch prinzipiell die Gefahr besteht, die Druckbelastbarkeit des Tanks zu überschreiten.

8 Links zu Herstellern

RATTWorks (<http://www.rattworks.com>)

West Coast Hybrids (<http://westcoasthybrids.homestead.com>)

Sky Ripper Systems (<http://www.skyrippersystems.com>)

Propulsion Polymers (<http://www.propulsionpolymers.com>)

HyperTEK (<http://www.hypertek.com>)

AeroTech (<http://www.aerotech-rocketry.com>)

Micro Hybrid (<http://www.hpr.org.uk/mhybrid>)