

Für Interessierte – die Physik hinter den Modellraketen

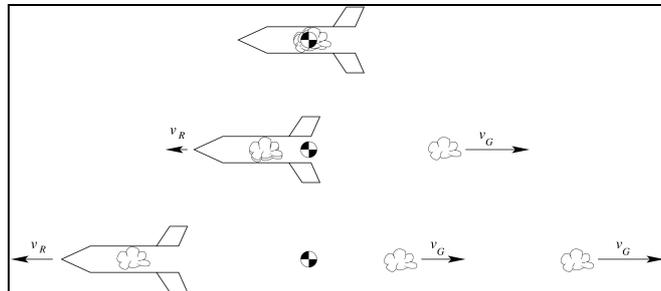
Von Andi Wirth & Andreas Müller, ARGOS

1. Rückstossprinzip

Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, wenn keine Kräfte auf ihn wirken. Als Newton diese grundlegende Erkenntnis formulierte, waren Raketen in China schon seit ein paar Jahrhunderten bekannt. Für einen zusammengesetzten Körper besagt die Newtonsche Physik, dass der Massenschwerpunkt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung verharrt. Zwei Tänzer drehen sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt, der sich gemächlich durch den Ballsaal bewegt, oder sogar an Ort bleibt. Löst sich ein Teil, muss sich der Rest in die entgegengesetzte Richtung bewegen, und zwar um so schneller, je schwerer das abgelöste Teil ist, und je schneller es sich vom gemeinsamen Schwerpunkt entfernt. Treffen zwei Billard-Kugeln aufeinander, werden sie so auseinanderstieben, dass der gemeinsame Schwerpunkt sich gleich bewegt wie vor dem Stoss.

Ein Raketenmotor besteht aus einem Behälter, der heisses Gas mit grosser Geschwindigkeit ausströmen lässt. Die Massenschwerpunkte von Behälter und Gas müssen sich so bewegen, dass ihr gemeinsamer Schwerpunkt unverändert bleibt. Bewegt sich das Gas schnell, verfügt es über den längeren Hebel, kann also mit weniger Masse die Bewegung des Behälters kompensieren (siehe Abb.). Die entscheidende Grösse ist also das Produkt Masse x Geschwindigkeit, der sogenannte Impuls (Masseinheit Ns, Newton-Sekunden). Der Impuls des Behälters und des ausströmenden Gases sind entgegengesetzt gleich gross:

$$m_{\text{Behälter}} v_{\text{Behälter}} = m_{\text{Gas}} v_{\text{Gas}}$$



Der Physiker sagt: Der Impuls bleibt erhalten. Ein Raketenmotor ist ein Impulsgenerator: Der Impuls des ausströmenden Gases ist entgegengesetzt gleich gross wie der Impuls des Raketenmotors. Bis zum Brennschluss des Motors strömt immer weiter Gas nach, so dass die Rakete ständig zusätzlichen Impuls erhält, jeweils den Impuls des ausströmenden Gases. Wird der Motor in eine Rakete eingebaut, die als ganzes beschleunigt wird, ist der Impuls der ganzen Rakete massgebend. Eine schwere Rakete wird eine geringere Geschwindigkeit erreichen als eine leichte. Eine 100g (0.1kg) schwere Rakete wird mit einem Raketenmotor von 10Ns also eine Endgeschwindigkeit von $10/0.1 = 100\text{m/s}$ (360km/h) erreichen.

Ein Raketenmotor kann das Gas durch eine grosse Öffnung in kurzer Zeit ausströmen lassen, der Impuls wird in diesem Fall in sehr kurzer Zeit erzeugt. Die erreichte Geschwindigkeit ist dabei die Beschleunigung multipliziert mit der Zeit, während der diese Auftritt, also $v = at$. Der Impuls andererseits ist $mv = mat$. Das Produkt Masse x Beschleunigung ist aber auch die Schubkraft, die auf die Rakete wirkt. Man erkennt: der Impuls ist auch das Produkt von Schubkraft und Brenndauer. Ein Motor kann seinen Impuls erzeugen, indem er lange mit geringem Schub brennt, oder kurz mit hohem Schub. Insbesondere ist ein Motor durch seinen Impuls und seinen mittleren Schub weitgehend beschrie-

ben.

In der Diskussion haben wir bisher vernachlässigt, dass sich die Masse der Rakete verändert. Bei Modellraketen ist die Masse des Treibmittels im Vergleich zur ganzen Rakete verschwindend klein. Bei den grossen Vorbildern hingegen macht es den grössten Teil der Masse aus, die Berechnung der Beschleunigung und der Endgeschwindigkeit wird damit etwas komplizierter, und findet ihren Ausdruck in der Raketengleichung von Ziolkovsky. In der Linkliste findet der interessierte Leser weiterführende Literatur dazu.

Beispiele

Auf welche Weise der Druck im Behälter erzeugt wird, ist für die beim Ausströmen der Gase entstehende Kraft unerheblich. Entscheidend sind die Masse der ausströmenden Teilchen und deren Ausströmgeschwindigkeit. Dazu einige Beispiele:

Luftballon: Beim Aufblasen wird die elastische Haut gespannt. Diese erzeugt den Innendruck. Durch die Öffnung entweicht Luft und beschleunigt den losgelassenen Ballon. Hier ist die Energie physikalisch gespeichert in der Federkraft der Ballonhaut und dem komprimierten Gas; mittlere Ausströmgeschwindigkeit, geringe Teilchenmasse.

Wasserrakete: Die Luft im Behälter wird beim Aufpumpen komprimiert. Nach dem Loslassen wird durch den Druck das Wasser ausgestossen und beschleunigt. Die Energie ist physikalisch gespeichert: im komprimierten Gas; geringe Ausströmgeschwindigkeit, mittlere Teilchenmasse, aber sehr hohe Gesamtmasse. Ohne Wasser steigt die Rakete nur wenig, weil die ausströmende Masse zu gering ist!

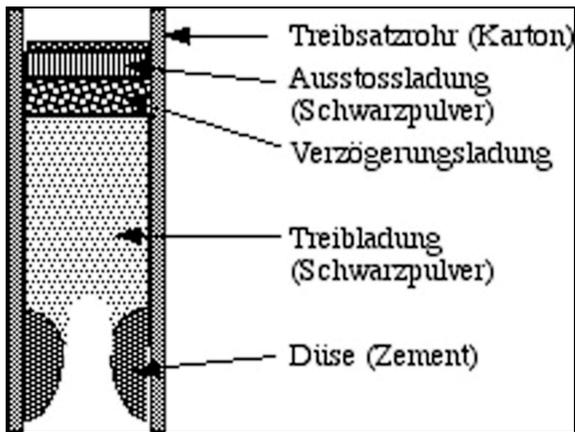
Rakete: Der Brennstoff im Triebwerk verbrennt und erzeugt dabei heisse Gase mit einem sehr hohen Druck. Hier ist die Energie chemisch gespeichert im Brennstoff; sehr hohe Ausströmgeschwindigkeit, mittlere Masse.

Flugzeugtriebwerk: Funktioniert im Prinzip gleich wie beim Raketentriebwerk. Allerdings wird ein grosser Teil des Treibstoffes – nämlich der Sauerstoff – nicht mitgeführt, sondern der Umgebung entnommen. Dadurch steigt der Wirkungsgrad, allerdings ist der Betrieb nur innerhalb der Lufthülle möglich.

Impulsantrieb in Star Trek: normalerweise verwendet ein Raumschiff in der Science Fiction Serie Star Trek (Raumschiff Enterprise) den Warpantrieb, der allen physikalischen Gesetzen zum Trotz Reisen schneller als Licht ermöglicht. Manchmal aber, bei technischen Problemen, oder beim langsamen Navigieren im Orbit um einen Planeten, wäre der Warpantrieb schlicht zu kräftig, dann wird der Impulsantrieb eingesetzt. Was das genau ist, wissen wir nicht, wir leben ja nicht im 24. Jahrhundert, aber wir können auf Grund des Namens vermuten, dass es ein Impulsgenerator wie unsere Modellraketenmotoren ist.

2. Der Modellraketenantrieb

Die Umsetzung des Impulssatzes erleben Modellraketenbauer in ihrem Hobby bei jedem Start. Die Antriebe unserer Modellraketen sind in der Regel Feststofftreibsätze. Als Treibmittel wird in kleinen Motoren Schwarzpulver, in den grösseren ein Mischung von Ammoniumperchlorat und Gummi eingesetzt. Schwarzpulvermotoren werden mit bis ca. 3-25g Treibmittel gebaut, grössere Motoren lassen sich mit Schwarzpulver nicht zuverlässig herstellen, sie neigen zum Explodieren. Gezündet wird die Ladung über einen mit Zündmittel überzogenen Draht, der durch einen elektrischen Strom erhitzt wird. Wenn die Treibladung abgebrannt ist, entzündet sie die Verzögerungsladung, diese dann nach 3-10s die Ausstossladung für das Bergungssystem (Fallschirm oder Strömer).



3. Aerodynamik und Flugleistungen

Die Flugleistungen einer Rakete werden bei gleichbleibendem Treibsatz durch ihre Masse und ihre aerodynamische Güte bestimmt.

Leichte Raketen erreichen bei Brennschluss des Treibsatzes hohe Geschwindigkeiten. Mehrstufige Raketen kommen manchmal nahe an die Schallgeschwindigkeit; einstufige erreichen bis zu 150m/s, was über 500km/h entspricht!

Luftkräfte steigen mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Der Luftwiderstand (parallel zur Längsachse, entgegen der Flugrichtung) kann bei 150m/s einen Wert im Bereich von 20N erreichen, also etwa dem Gewicht einer Masse von 2kg entsprechend. Wenn bei diesen Kräften eine Rumpfnase nicht genügend fest sitzt und nur leicht wackelt, kann sie in Sekundenbruchteilen umgeknickt werden, was die Rakete praktisch auf der Stelle zerreiht. Auch eine schief oder zu wenig fest sitzende Flosse kann die Rakete ausser Kontrolle geraten lassen.

Bei einer High-power-Rakete muss unter Anderem auch gerechnet werden, wie nahe an die Schallgeschwindigkeit sie kommen kann – oder ob diese gar überschritten wird. Das hat gravierende Auswirkungen auf das Design. Vor allem die Flossen müssen wegen der Schockwellen nahe der Schallgeschwindigkeit und im Überschallbereich sehr stabil gebaut werden. Richtig ausgelegt, können diese Raketen Geschwindigkeiten über Mach 2 und Höhen von mehreren tausend Metern erreichen.

4. Flugstabilität

Das nebenstehende Bild zeigt eine klassische Level 1 –Rakete (Black Brant Vb; Version von PML) in der Grafik einer Computersimulation (RockSim, Apogee Rocketry). Zu sehen sind alle Teile der Zelle (Nase, Körperrohr, Flossen, Motorhalterung), der Fallschirm (P für Parachute), der Kolben (unter dem Fallschirm; dient zum sauberen Ausstoss und als Schutz vor den heissen Gasen), sowie der Raketenmotor (H123W). Die beiden kreisförmigen Symbole zeigen, wo nach der Simulation der Schwerpunkt (CG für Center of gravity; Karomuster) und der Druckpunkt (CP für Center of pressure) liegen werden.

Der Schwerpunkt wird aufgrund der Materialdichten berechnet, der Druckpunkt nach der Barrowman-Methode, die bis zu Anstellwinkeln von etwa 5-10° recht genaue Ergebnisse liefert. Für den Flug der Rakete reicht das bei Weitem, weil die Vorwärtsgeschwindigkeit bei deutlich über den zu erwarteten Seitenwinden liegt.

Sobald sich die Rakete leicht schräg stellt, entsteht durch den Anstellwinkel an den allen Raketenteilen (Nase, Rohr, Flossen) Auftrieb. Die resultierende all dieser Teilkräfte greift im Druckpunkt an. Die Komponente senkrecht zur Längsachse der Rakete bewirkt dabei ein Moment, das die Rakete wieder in Flugrichtung

dreht. Die Stabilisierung kommt also auf die gleich Art zustande wie bei einem Pfeil oder einem Speer.

Um die Flugstabilität zu erhöhen, kann man also Balast in die Nase einbringen, die Flossen vergrössern oder das Rohr verlängern. All diese Massnahmen vergrössern den Abstand zwischen CG und CP und vergrössern damit das Drehmoment. Der Raketenbauer überprüft vor jedem Start die gegenseitige Lage von CG und CP, geflogen werden darf nur bei ausreichender Stabilität.

