

Richtiges Design von Bergungs-Systemen

Kap. 2 : Dimensionierung

von Jürg Thüring

© 1998 Spacetec GmbH

Vervielfältigung in irgend einer Form ohne schriftliche Genehmigung verboten.

Der erste Teil dieser Serie befasste sich neben grundsätzlichen Betrachtungen vor allem mit der richtigen Bemessung von Ausstossladungen. Die vorliegende zweite Folge zeigt die richtige Dimensionierung von Modellraketen Bergungssystemen.

Bei grösseren Raketen reicht „über den Daumen abschätzen“ nicht mehr aus, um die Flugsicherheit zu gewährleisten, Berechnungen geben hier die nötige Gewissheit. Dies erfordert zwar etwas Zahlenakrobatik, aber der Aufwand lässt sich nicht vermeiden:

Bei High Power Modellen ist es sicherheitsrelevant zu wissen, dass das Bergungssystem den auftretenden Belastungen gewachsen ist!

Klassisch wird davon ausgegangen, dass die Rakete senkrecht emporsteigt, ihre Geschwindigkeit dabei stetig reduziert, endlich einen Moment stillsteht, um just in diesem Moment den Fallschirm auszustossen.

Die Realität sieht jedoch anders aus: Vor allem grössere Raketen beginnen ihre Flugbahn in der Nähe des Scheitelpunktes zu neigen, fliegen also eine Kurve und behalten immer eine gewisse Geschwindigkeit bei. Je nach Stärke des Windes wird diese Kurve weiter und mit grösserer Geschwindigkeit geflogen. Oder aber die Ausstossladung zündet aus irgend einem Grunde nicht genau im optimalen Moment und die Rakete hat immer noch oder schon wieder nennenswerte Fluggeschwindigkeit.

Ein sicheres Bergungssystem muss also auch einen Ausstoss bei teilweise beträchtlichen Geschwindigkeiten unbeschadet überstehen können.

Als Faustregel sollte man von mindestens 200-300km/h beim Fallschirmausstoss ausgehen um genügend Reserven zu haben.

Bremswirkung von Fallschirmen

Heute kennt man sehr viele Fallschirm-Bauformen mit sehr unterschiedlichen Charakteristiken, für verschiedenste Anwendungszwecke. Im Raketenmodellbau kommen vor allem der „circular flat“ Fallschirm (aus einem flachen, rund geschnittenen Stück Folie oder Gewebe hergestellt), der „konische“ Fallschirm (konische Fallschirmhülle im Flug) und der „X-Form“-Fallschirm zum Einsatz. Aufgrund seines schlechten Öffnungsverhaltens und seiner grossen Neigung zu pendeln, ist der „circular flat chute“ nur für kleinere Modelle geeignet.

Wesentlich besser in beiden Beziehungen sind der „conical chute“ und der „X-form chute“.

Um die Sinkgeschwindigkeit der Rakete beziehungsweise die nötige Fallschirmgrösse bestimmen zu können, benötigen wir Angaben zur Bremswirkung des Schirmes. Die Tabelle auf Seite 5 (Quelle: Knake: „Parachute Recovery Systems“) listet unter anderem für die verschiedenen Bauformen den zugehörigen Luftwiderstandsbeiwert C_w auf. Leider sind die entsprechenden Angaben von Fallschirmherstellern im Bereich Modellraketen kaum zu erhalten, jedoch genügt diese Tabelle für eine annähernde Berechnung.

Für die Bremswirkung gilt:

$$(1) \quad F_{Brems} = c_w * A * \frac{\rho}{2} * v^2$$

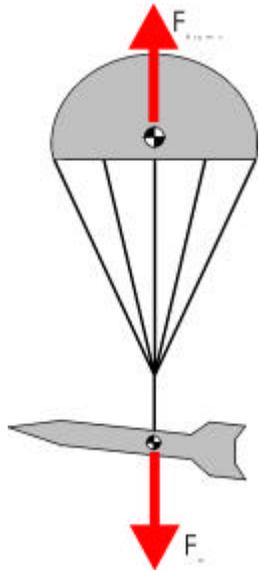
F_{brems}	=	Bremskraft in Newton [N]
A	=	Fläche des Fallschirmes [m ²]
v	=	Fluggeschwindigkeit [m/s]
ρ	=	Luftdichte [kg/m ³] (typisch 1.225 kg/m ³ auf Meereshöhe, 1.121 kg/m ³ auf 1000m)

Zu beachten ist dabei die Tatsache, dass der Luftwiderstand mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zunimmt, die Werte können also schnell sehr gross werden!

Weiter gilt für die Gewichtskraft der Rakete

$$(2) \quad F_G = m_{Rak} * g$$

m_{rak} = Gewicht der Rakete [kg]
 g = 9.81 [m/s²] (Erdbeschleunigung)



Die Rakete sinkt genau so schnell, dass die Bremswirkung des Fallschirms und die Gewichtskraft der Rakete sich die Waage halten, durch Gleichsetzen und Umformen der Gleichungen (1) und (2) erhalten wir somit:

$$(3) \quad V_{Sink} = \sqrt{\frac{2 * m_G * g}{A * C_w * \rho}}$$

Bei Modellraketen haben sich Sinkgeschwindigkeiten von etwa 45m/s als guten Kompromiss zwischen geringer Abdrift und unbeschädigter Bergung erwiesen.

Dieser Wert kann also als V_{Sink} eingesetzt werden und damit erhalten wir die nötige Fallschirmfläche.

$$(4) \quad A = \frac{m * g * 2}{v_{Sink}^2 * \rho * c_w}$$

beziehungsweise für den Fallschirmdurchmesser D:

$$(5) \quad D = \sqrt{\frac{8 * m * g}{v_{Sink}^2 * \rho * c_w * \pi}}$$

$\pi = 3.1415$
 D in [m]

Diese ganzen Berechnungen sehen recht haarig aus, zum Glück erlauben uns moderne Taschenrechner jedoch solche Kalkulationen ohne grosses Kopfzerbrechen.

Schwingneigung bzw. Stabilität von Fallschirmen

Eine wichtige Kenngrösse von Fallschirmsystemen ist ihre Schwingneigung. Immer wieder sieht man Raketen unter ihren Fallschirmen heftig hin und her pendeln. Vor allem „circular flat“ Fallschirme sind mit ihrem typischen Schwingwinkel von +/- 40° hier problematisch, während der XForm Fallschirm zum Beispiel nur wenige Grad hin und her schwingt.

Bei „circular Flat“ Fallschirmen kann ein sogenanntes „Driftloch“ mit ca. 5% der Fallschirmfläche die Pendelneigung verringern, da der Fallschirm seine überflüssige Luft nicht mehr „ausschenken“ muss, sondern sie durch das Driftloch ablassen kann.

Pendeln führt dazu, dass die Rakete mehr oder weniger stark unter den Fallschirm hin- und herschwingt, was zu grossen Quergeschwindigkeiten bei der Landung und damit zu Beschädigungen führen kann.

Belastungen im Moment der Fallschirmöffnung (opening force)

Abhängig vom verwendeten Fallschirmtyp treten mehr oder weniger hohe Spitzenlasten im Moment der Fallschirmöffnung auf. Unglücklicherweise ist gerade der bei kleinen und mittleren Modellen oft verwendete, preisgünstige „circular flat“ Fallschirm in dieser Beziehung recht schlecht, er baut sehr hohe Schockbelastungen auf, während zum Beispiel der X-Form Fallschirm viel „sanfter“ öffnet.

Untenstehende Tabelle listet einige Fallschirmtypen und ihre wichtigsten Kenngrössen, darunter auch der „opening force“ Koeffizient (C_o) auf.

Der „opening force“ Koeffizient ist der Multiplikator welcher das Mass angibt, um welches die Bremskraft im Moment der Öffnung die nominale Bremswirkung übersteigt.

Gemäss Formel (1) ergibt sich also

$$(6) \quad F_{Schock} = F_{Brems} * c_x = c_w * A * \frac{r}{2} * v^2 * c_x \quad [N]$$

Bei einem „circular flat“ Fallschirm entsteht also eine Öffnungs-Spitzenkraft welche rund 1.7 Mal über der für diese Geschwindigkeit typischen Bremskraft liegt.

Die Schockleiste des Bergungssystems und deren Verankerung muss dieser Kraft standhalten können. Hier können bei grösseren Raketen je nach Geschwindigkeit momentan leicht einige hundert bis tausend Newton (10N entspricht 1 kp) Belastung anliegen!

Achtung, dieser Wert gilt nur für sogenannten „kontrollierten Fallschirmausstoss“. Damit meint man eine geregelte Sequenz für die Entfaltung, im Gegensatz zum „unkontrollierten Fallschirmausstoss“ wie er meistens bei Modellraketen eingesetzt wird. Bei unkontrolliertem Ausstoss können die Kräfte nochmals wesentlich höher liegen. Dieses Thema wird in der nächsten Folge behandelt.

Typ	Aufsicht	Profil	D _c / D ₀	D _p / D ₀	C _{w0}	C _x	durchschnittl. Schwingwinkel
Flat Circular			1.0	0.67 bis 0.70	0.75 bis 0.80	-1.7	+/-10° bis +/-40°
Conical			0.90 bis 0.95	0.7	0.75 bis 0.90	-1.8	+/-10° bis +/- 30°
Extended Skirt			0.81 bis 0.86	0.66 bis 0.70	0.78 bis 0.87	-1.4	+/-10° bis +/-15°
Cross			1.15 bis 1.19	0.66 bis 0.72	0.60 bis 0.85	-1.1 bis 1.2	0 bis +/-3°

Beim Auslegen des Bergungssystems sollte eine Restgeschwindigkeit beim Ausstoss von mindestens 200km/h = ca. 60m/s vorausgesetzt werden, um genügend Sicherheitsreserven zu haben.

Methoden zur Begrenzung der Öffnungskräfte

Bei grossen Fallschirmen (> 1.5m Durchmesser) können die Öffnungskräfte leicht so hoch werden, dass der Fallschirm bei einem Hochgeschwindigkeits-Ausstoss einfach abgerissen oder zerfetzt würde. Es gibt aber verschiedene Möglichkeiten, dies zu verhindern.

- Reefing: Reefing bezeichnet das vorübergehende zusammenfassen (raffen) der Leinen um eine sofortige volle Entfaltung des Fallschirms (und damit die volle Schocklast) zu verhindern. Der Fallschirm ist vorübergehend wesentlich kleiner, die Rakete wird auf ein erträgliches Mass abgebremst bevor der Fallschirm zur ganzen Entfaltung freigegeben wird. Reefing ist technisch recht aufwendig und wird im Raketenmodellbau selten eingesetzt.
- Zweistufiges Bergungssystem: Im ersten Moment wird ein kleinerer Fallschirm ausgeworfen, welcher die erste Bremsung übernimmt. Anschliessend wird der Hauptfallschirm bei einer (durch die Grösse des kleinen Fallschirms) definierten Geschwindigkeit ausgestossen, eine Überlastung des Systems kann so praktisch ausgeschlossen werden. Zweistufige Systeme werden in Verbindung mit Höhenmessern auch zur Verringerung der Abdrift eingesetzt, rein prinzipiell genügt jedoch bereits ein einfacher Timer, welcher den Hauptschirm um einige Sekunden verzögert freisetzt.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass grosse Fallschirme (über 2m Durchmesser) nicht mehr einfach wie bei kleineren Raketen „irgendwie ausgestossen“ werden dürfen (sog. unkontrollierter Ausstoss) sondern zwingend kontrolliert ausgebracht werden müssen. Kontrollierter Fallschirmausstoss heisst im Wesentlichen, dass die Leinen des Fallschirms gestreckt sein müssen bevor sich das Canopy entfalten kann. Nur so kann verhindert werden, dass der Fallschirm überlastet und allenfalls beschädigt wird.

Richtige Wahl der Schockleine

Schockleinen übernehmen grundsätzlich zwei Funktionen in der Bergungsphase der Rakete:

Zum einen überträgt die Schockleine die Bremskraft des Fallschirmes auf die Rakete, eine weitere wichtige Aufgabe besteht aber auch darin, die weggesprengte Raketenspitze wieder abzubremsen und somit Booster und Spitze zusammenzuhalten.

Vor allem bei kleineren Raketen werden oft elastische Schockleinen verwendet, welche die leichte Raketenspitze problemlos abbremsen und auch den Booster bequem tragen können.

Bei grossen Raketen ab etwa 3kg Gewicht ist von der Verwendung von Elastik abzuraten, da die meisten erhältlichen Elastik-Bänder und Seile eine zu geringe Bruchlast aufweisen, um die oft noch zusätzlich mit Ballast beschwerte Spitze zuverlässig abstoppen zu können.

In letzter Zeit sind Kevlar-Schockleinen vor allem in den USA als vermeintlich letzter Schrei beliebt, vor allem weil Kevlar im Vergleich zu anderen Materialien eine gute Hitzebeständigkeit aufweist (Ausstossladung!). Natürlich ist auch die extrem hohe Festigkeit von Kevlar reizvoll.

Leider wird aber vergessen, dass Kevlar fast vollständig unelastisch ist. Dadurch wird die abgesprengte Spitze sehr heftig gestoppt, es entstehen ungeheure Belastungsspitzen welche die grössere Festigkeit des Kevlars mehr als kompensieren und oft zum Versagen der Schockbandverankerung führen. Zum Vergleich ist es schmerzhaft, wenn man in eine Betonwand rennt, nicht jedoch wenn diese mit einer dicken Schicht Schaumstoff gepolstert ist.

Das einzige richtige Material für Schockbänder von grossen Raketen ist „Tubular Nylon“, ein endlos gewobener Nylon-Schlauch!

Tubular Nylon ist sehr belastbar und, was vor allem wichtig ist, kann sich je nach Gewebe um ca. 5% dehnen. Um einen vernünftigen Bremsweg für die Spitze zu ermöglichen, werden Schockbänder von 5m Länge und mehr verwendet. Dadurch wird die Spitze etwas „weicher“ als bei Kevlarbändern eingefangen, die Belastung bleibt um Faktoren tiefer.

Der einzige Nachteil von Nylon, die schlechtere Hitzeresistenz, lässt sich mit Nomex-Hüllen oder Gaskühlern wie wir sie von Aerotech-Modellen her kennen, kompensieren.

Oder aber man kombiniert ein Tubular-Nylon Schockband mit einem Stück hitzebeständigem Kevlar im Bereich der Ausstossladung und vereinigt so die Vorteile der beiden Materialien.

Die Bremskraft (konstante Bremsung angenommen) berechnet sich zu

$$(5) \quad F_{Brems} = m_{Spitze} * a = m_{Spitze} * \frac{v_{Spitze}^2}{2 * s_{Brems}}$$

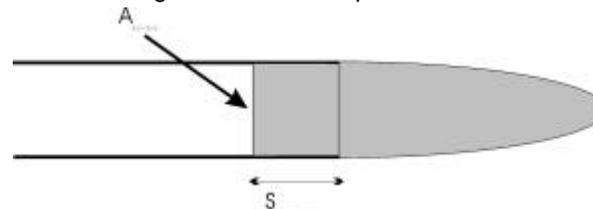
M_{Spitze} = Masse der Spitze [kg]
 v = Durch Ausstossladung erzielte Geschwindigkeit

Weiter lässt sich die Ausstossgeschwindigkeit der Spitze wie folgt berechnen:

$$(6) \quad v_{Spitze} = \sqrt{\frac{2 * s_{Schulter} * p * A_{Spitze}}{m_{Spitze}}}$$

$s_{Schulter}$ = Länge der Rohr/Spitze-Ueberlappung [m]
 p = Druck durch Ausstossladung, typisch 130'000pa
 A_{Spitze} = Grundfläche des eingeschobenen Spitzenteils [m²]
 M_{Spitze} = Gewicht der Spitze [kg]

Typisch werden mit richtig dimensionierten Ausstossladungen Geschwindigkeitswerte der Spitze zwischen 10 und 20m/s erreicht.



Eingesetzt in Gleichung (5) erhalten wir für eine 1.5kg schwere, mit 15m/s ausgestossene Spitze und einem 5m langen tubular Nylon Schockband (5% Dehnung = 0.25m Bremsweg S_{Brems}) einen Wert von 675Newton für die Bremskraft, was einer nicht unerheblichen Gewichtskraft von 68kg entspricht!

Die vermeintlich sichere „nehmen wir die doppelte Ladung, dann kommt der Fallschirm sicher heraus“ - Methode erhöht die Geschwindigkeit auf das Doppelte und damit diese Last auf 2700Newton, über 270kg! Die meisten Schockleinen, beziehungsweise deren Verankerungen, würden hier wohl kaum mehr mitmachen! Aus diesem Grunde ist eine sorgfältige Dimensionierung der Ausstossladung, und wenn irgendwie möglich ein vorhergehendem Test am Boden, bei grossen Raketen ein Muss, „zu viel“ ist genauso problematisch wie „zu wenig“.

Diese Zahlen zeigen aber auch, welche Energie Ausstossladungen von nur 1-2g Schwarzpulver freisetzen, Respekt ist hier sicherlich angebracht. Immerhin entspricht dies der Ladung einer typischen Pistolenpatrone!

Bei sehr grossen, schweren Raketen wird es sinnvoll, die Rakete gleich in zwei Teile zu trennen.

(Ende Teil 2)