

Dimensionierung von Auswurfladungen

Ziel bei Modellraketen ist es i.d.R., diese Modelle sicher zu bergen. Eine klassische Methode besteht in der Zündung einer Treibladung, die zu einem bestimmten Zeitpunkt die Rakete trennt und den Fallschirm freigibt.

Im Internet findet man mehrere Darstellungen zur Dimensionierung der Ladungsgröße. Leider musste der Autor feststellen, dass die verschiedenen Formeln sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern. Da widersprüchliche Angaben nicht hilfreich sind, kamen dem Autor deshalb Zweifel an den Darstellungen. Bestärkt wurde er in dieser Vermutung durch Aussagen, die sich widersprachen. Einige Modellflieger halten die Dämmung der Auswurfladung für sehr wichtig, andere nicht. Die Ergebnisse der Recherchen des Autors sind Gegenstand dieses Papiers.

Für Sprengstoffe werden verschiedene Kennwerte angegeben. Dabei handelt es sich u.a. die Explosionswärme, die Explosions-temperatur, das (normale) Schwadenvolumen, die spezifische Energie und die Detonationsgeschwindigkeit. Die in [3] angegebenen Werte werden in der nachstehenden Tabelle angegeben.

Name	Dichte	Explo- sions- wärme	Explo- sions- tempe- ratur	Normales Schwade nvolumen	Spez. Energie	Detona- tions- geschwin- digkeit
	[g/cm ³]	[kJ/kg]	[k]	[l/kg]	[kJ/kg]	[m/s]
Schwarz- pulver	1,1	2786	2380	280	285	400
Schieß- baumwolle	1,3	4400	3150	765	1003	6800

Für das Verständnis der chemischen Vorgänge und damit die Auswahl des richtigen Berechnungsmodells ist es hilfreich zu wissen, was die Kennwerte bedeuten. Aus der Reaktionsgleichung kann die Explosionswärme (oder im Experiment mit einer manometrischen

Dimensionierung von Auswurfladungen

Bombe) und das Schwadenvolumen ermittelt werden. Das normale Schwadenvolumen bezieht sich auf einen Umgebungsdruck von 101,3 kPa und einer Umgebungstemperatur von 0°C (273K).

Aus der Explosionstemperatur und dem Explosionsdruck kann die spezifische Energie ermittelt werden. Die spezifische Energie gibt an, welchen Druck ein kg Sprengstoff erzeugt, der in einem festen Volumen von einem Liter abgebrannt wird.

In [1] und [2] wird die thermische Zustandsgleichung für ideale Gase herangezogen, um die benötigte Pulvermenge zu bestimmen. Für den Einsatz in der Praxis werden dimensionierte Formeln angegeben. Bei der Anwendung der amerikanischen Variante (siehe [2]) muss der Anwender zwischen einer größeren Anzahl von Alternativen wählen. Eine Hilfe, welche Alternative die richtige ist, wird nicht wirklich angegeben.

Um den Aufwand gering zu halten, wandte sich der Autor nur der in [1] beschriebenen Formel zu. Die für die Bestimmung der Pulver-

menge benutzte Formel wird mit $m = \frac{\Delta p V}{RT}$ (Gl.1) angegeben. Setzt man

für ein Zylindervolumen die angegebenen Werte in die Formel ein,

so erhält man: $m = \frac{\Delta p V}{RT} = \frac{100}{119,12 \cdot 1837} \frac{\pi}{4} D^2 L = 0.000358 D^2 L$. Außerdem gilt

$\Delta p = 1 \text{ bar}$. Damit lässt sich die Herkunft der angegebenen dimensionierten Gleichung $m[\text{g}] = 0.00038 D^2 L[\text{cm}^3]$ zeigen.

Was bedeuten nun diese Zahlen?

In [6] wird zur Bestimmung der Gasmenge folgende Reaktionsgleichung $4\text{KNO}_3 + 7\text{C} + \text{S} \rightarrow 3\text{CO}_2 + 3\text{CO} + 2\text{N}_2 + \text{K}_2\text{CO}_3 + \text{K}_2\text{S}$ genutzt. Aus 520g SP entstehen 8mol Gas, das entspricht 0,015 mol/g. Die spezifische Gaskonstante ist dann $8,314\text{J/molK} / 0,015\text{mol/g} = 125\text{J/kgK}$.

Bei 20°C liefert 1kg Pulver ein Schwadenvolumen von etwa

$m[\text{kg}] = \frac{\Delta p V}{RT} = \frac{100}{125 \cdot 293} V[\text{l}] = 366[\text{l}]$. Wie groß das benötigte Volumen

Dimensionierung von Auswurfladungen

wirklich ist, hängt von der erreichten Temperatur ab. Im obigen Beispiel beträgt das Verhältnis $1837/293 = 6,27$.

Bewertung der Ergebnisse

Mit der Definition aus [1] für die spezifische Energie Q_{spez} kann man

folgende Formel notieren $Q_{spez} = \frac{pV}{m}$ (Gl.3). Beim Vergleich mit

(Gl.1) kann festgestellt werden, dass $Q_{spez} = RT$ gelten muss. Der Wert für RT aus [1] sollte daher etwa dem Wert in der obigen

Tabelle entsprechen: $Q_{spez} = RT = 119,12 \frac{Nm}{kgK} * 1837K \approx 219 \frac{kJ}{kg}$. Setzt man die

in der Tabelle angegebene Explosionstemperatur von 2300K, erhält man eine spezifische Energie von etwa 250 kJ/kg. Erhöht man die 119J/kgK auf 125J/kgK ergibt sich ein Wert 287kJ/kg. Diesen Wert findet man auch in der Tabelle.

Als Ergebnis dieser doch sehr ausführlichen Betrachtungen stellt der Autor fest, dass mit der in [1] angegebenen Formel das Gasvolumen einer gegebenen Menge Schwarzpulver bestimmt werden kann. Die berechneten Mengen sind aber zu groß.

Alternative Betrachtung

Für eine Mengebestimmung ist erforderlich, sich mit dem physikalischen Vorgang vertraut zu machen. Das bei der Verbrennung entstehende Gasvolumen soll Arbeit verrichten. Diese Arbeit besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen. Erstens soll die Spitze mit einer definierten Geschwindigkeit angetrieben werden und zweitens müssen dazu vorhandene Reibkräfte zwischen Rakettenrohr und Spitze überwunden werden. Der Vorgang ist einem Pistolenschuss nicht unähnlich und die Gesetze der Innenballistik können angewandt werden. Für eine überschlägige Bestimmung ist das Verfahren zu komplex und der Autor fand bei Recherchen eine einfachere Möglichkeit. In [5] werden dem Fallschirmausstoß ähnliche Aufgaben gehandelt. Allerdings geht es dort um eine größtmögliche (explosionsartige) Beschleunigung zum Zwecke der Materialprüfung. Physikalische Basis dieser Versuchsanlagen bildet

Dimensionierung von Auswurfloadungen

die Abelsche Gleichung $p_{\max} = \frac{f_c m}{V_b - m\rho}$ (Gl.4). Sie besagt, dass der maximale Druck p_{\max} in einem abgeschlossenen Verbrennungsraum V_b sich aus einer Pulverkonstante f_c und der Pulvermenge m ergibt. Das Pulver hat die Dichte ρ . Die Pulverkonstante f_c sollte als Materialkonstante bei entsprechenden Prüfstellen bei der Prüfung des Pulvers ermittelt werden. In [5] wird aber zusätzlich auf den Zusammenhang zwischen Explosionswärme und der Pulverkonstanten f_c hingewiesen: $f_c = Q_{ex}(\kappa - 1)$. Setzt man $\kappa = 1,3$ und geht davon aus, dass das Volumen der Pulvermenge als gering gegenüber dem Verbrennungsraum anzunehmen ist, dann vereinfacht sich (Gl.4.) zu

$p_{\max} = 0,3 \frac{Q_{ex} m}{V_b}$ (Gl.5). Um (Gl.5) mit (Gl.2.1) vergleichbar zu machen,

wird eine dimensionierte Formel hergeleitet. Nach dem Umstellen

und Einsetzen erhält man zunächst $m = 3,33 \frac{100.000 \frac{N}{m^2}}{2786 \frac{kJ}{kg}} V = \frac{333.000 \frac{N}{m^2}}{2786 \frac{Nm}{g}} V$. Als

Ergebnis erhält dann $m[g] = 0,120V[l]$, was etwa ein Viertel des Wertes von (Gl.2.1) ist.

Um die Raketenspitze aus zu werfen, muss Arbeit verrichtet werden.

Dazu lässt sich die folgende Formel angeben: $m_{Spitze} \frac{v^2}{2} = (F_{Druck} - F_{Reibung}) x_s$.

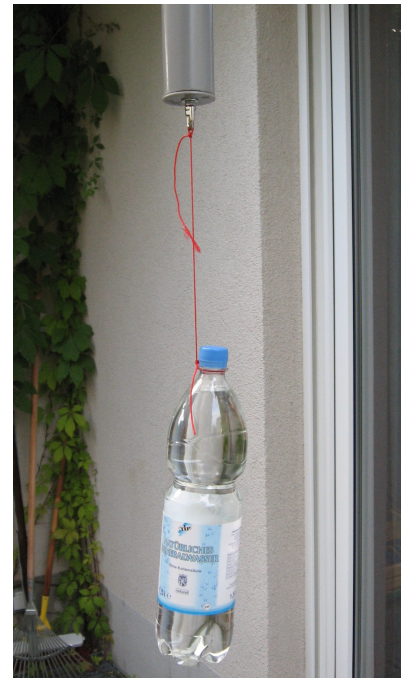
Die kinetische Energie, die die Spitze beim Auswurf annimmt, ergibt sich aus der Druckkraft der Pulvergase abzüglich der zu überwindenden Reibkraft zwischen Rohr und Spitze. x_s ist dabei der Weg, den die Spitze im Rohr zurücklegt.

Die Geschwindigkeit kann als Entwurfparameter vorgegeben werden. Die Druckkraft ergibt sich aus der eingesetzten Pulvermenge und dem Rohrdurchmesser. x_s ist ein konstruktiver Parameter der Raketenspitze. Bleibt die Bestimmung der Reibkraft. Sie kann überschlägig im Experiment ermittelt werden. Dazu wird die Rakete mit eingesteckter Spitze kopfüber aufgehängt. An der Spitze werden

Dimensionierung von Auswurfloadungen

solange Gewichte befestigt, bis die Spitze herausfällt. Sollte die Spitze herausfallen, dann kann die Spitze gewogen werden. Mit $F = g m_{Spitze}$ kann die Reibung bestimmt werden.

Die obigen Überlegungen wurden experimentell überprüft. Der Autor führte deshalb zu einem Experimente mit einer steckbaren Rohrverbindung und zum anderen mit einer manometrischen Bombe aus. Alle Ladungen waren augenscheinlich gleichmäßig verdämmt und wurden elektrisch gezündet.



Die Berechnungen ergaben, dass obige Anordnung mit etwa 100mg Schwarzpulver sicher getrennt werden können. Die optisch wahrgenommene Geschwindigkeit war geringer als die Vorgabe, dennoch folgt der Deckel etwa einen Meter hoch. Mit 50mg Schwarzpulver war keine Trennung mehr möglich.

Rakete		Auswurfdaten	
Durchmesser [mm]	50	Auswurfeschw. [m/s]	15
Masse der Spitze [g]	25	[km/h]	54.0
Sockellänge [mm]	30	Elephant FFFg	
Rohrlänge [mm]	750	Dichte Pulver [g/cm³]	1.1
Reibgewicht [kg]	1.6	Expl.-wärme [J/g]	2650
Volumen [l]	1.473	Isentropenkoeffizient	1.3
Beschl.-Kraft/Reib. [N]	93.75	15.70	Berechnen
Druck im Rohr [bar]	0.56		
Pulvermasse [g]	0.103		
Pulvervolumen [cm³]	0.094		Ende

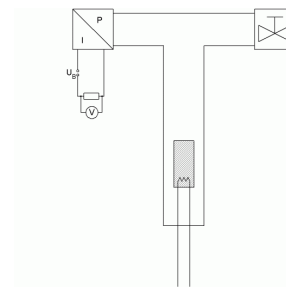
Nach [1] ergibt sich mittels der dimensionierten Formel eine Menge von $m[g] = 0.00038 D^2 L[cm^3] = 0,00038 * 5 * 5 * 75 = 0,71$. Das ist etwa das Siebenfache! Nach [2] ergibt sich für einen Überdruck von etwa einem bar

Dimensionierung von Auswurfladungen

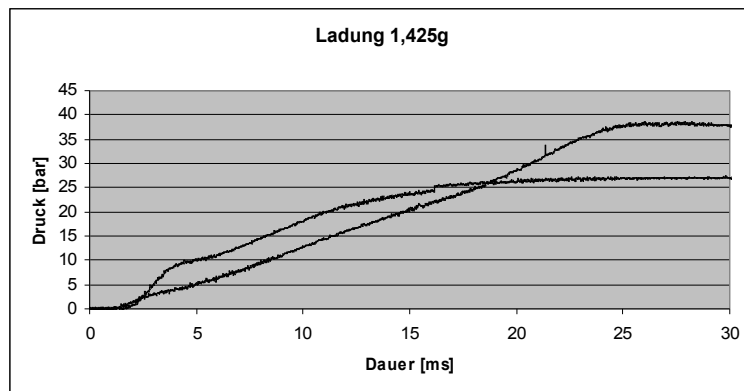
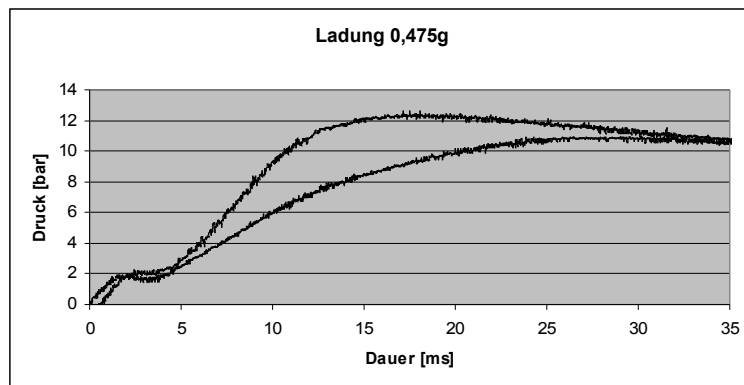
(15 psi): $m[g] = 0.006 D^2 L[in^3] = 0,006 * 1,97 * 1,97 * 29,5 = 0,68$. Allerdings erstreckt sich die mögliche Menge von 0,23g bis zu 0,91g.

Die Ergebnisse, die mit einer manometrischen Bombe ermittelt wurden, sind auf der folgenden Seite aufgeführt. Die Bewertung der Messwerte zeigt, dass ein einfacher Versuchsaufbau für die Bestimmung der spezifischen Kenngrößen nicht geeignet ist, da die Abgabe der Wärmeenergie an den umgebenden Druckkörper erheblich ist.

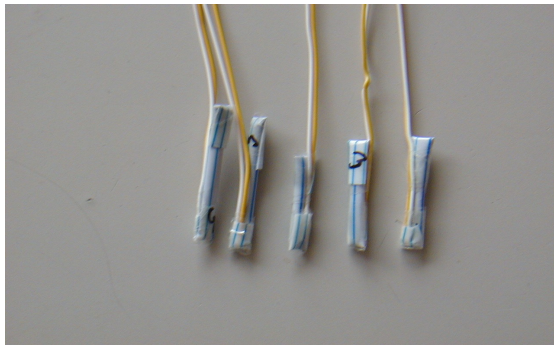
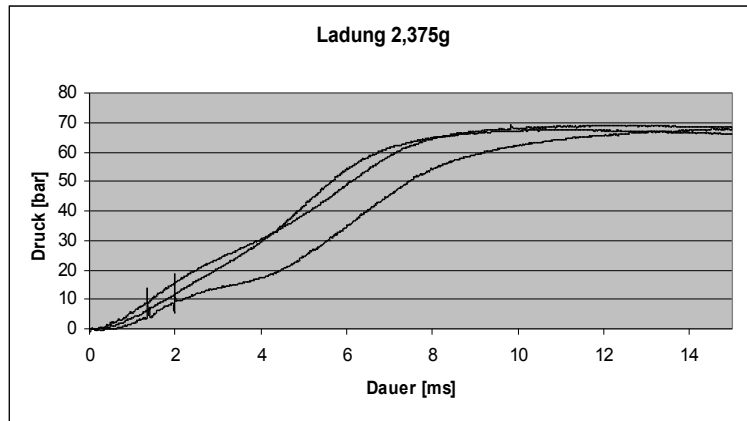
m [g]	0,475	1,425	2,375
V [cm³]	58,7	54,8	49,2
T [°C] (geschätzt)	30	45	65
t [ms]	20,0	21,0	10,0
p [bar]	11,3	33,1	67,8



Die Abbildungen zeigen, dass der Abbrandvorgang trotz augenscheinlich gleich ausgeführten Ladungen doch unterschiedlich ausfällt.



Dimensionierung von Auswurfladungen

**Probeladungen****Versuchsaufbau**

- [1] Richtiges Design von Bergungssystemen, Jörg Thüning, Spacetec GmbH, 1998
- [2] Rocketry Online:
http://www.info-central.org/recovery_powder.shtml
- [3] Militärchemie - Eine Einführung; E. Ammedick; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffchemie, Leipzig; 6. Auflage 1988
- [4] Schwarzpulver; T. Dörfler; WWU Münster WS06/07
- [5] Innenballistische Berechnungen zu Prüfsystemen mit Antrieb durch Treibladungspulver; P. Julisch; MP Materialprüfung Jahrg. 47 (2005) 9
- [6] Chemistry of Fireworks; Michael S. Russell; Auflage: 0002 (11. November 2008)