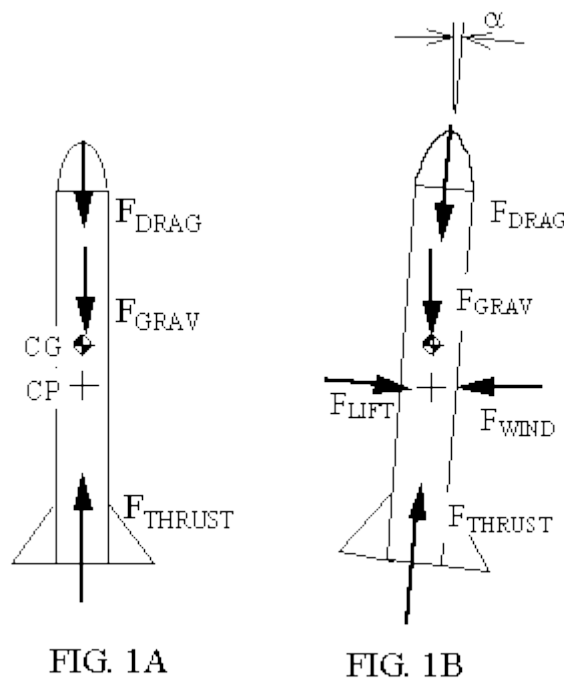


Aufbau der Flaschenrakete

Grundprinzip Aerodynamik (Schwerpunkt & Druckpunkt):

Die Aerodynamik kleiner Raketen (z. B. Modellraketen) beruht im Wesentlichen auf dem Zusammenspiel von Schwerpunkt (Massenmittelpunkt der Rakete) und Druckpunkt (Angriffspunkt der resultierenden aerodynamischen Kräfte). Diese bestimmen die Flugstabilität.

Eine Passive Flugstabilisierung ist bei jeder Rakete anzustreben. Dies ist gegeben, sobald der Schwerpunkt in Flugrichtung vor dem Druckpunkt liegt. Der Abstand zwischen SP und DP sollte ca. 1–2 Kaliber (Raketendurchmesser) betragen.



STABLE ROCKET -- CP AFT OF CG

Abbildung 1: Stable Rocket

Quelle: <https://antwortenhier.me/q/stabilitaet-der-rakete-waehrend-des-fluges-warum-aendert-die-auftriebskraft-143452964425>

Warum Finnen?

Generell funktionieren Finnen, indem sie, wenn die Rakete leicht von der Flugrichtung abweicht, ein Luftstrom schräg auf die Finnen trifft. Dies erzeugt eine aerodynamische Rückstellkraft um den Schwerpunkt, welche der Störung entgegenwirkt.

Wir nutzen Finnen am Ende der Rakete, selbst mit einer Passiven Stabilisierung, um die Flugbahn auch in dem Bereich des Fluges kontrolliert zu halten, der für eine passive Stabilisierung durch Schwerpunkt und Druckpunkt noch nicht schnell genug ist, bzw. nicht genug Luftstrom bietet.

Wie viele Finnen?

Weniger als drei Finnen bieten keine vollständige seitliche Abdeckung und führen zu Instabilität oder unkontrollierter Rollbewegung. Mehr als drei, etwa vier oder fünf Finnen, abgesehen der höheren Massenkalkulation, erhöhen den Luftwiderstand deutlich, was zu einem geringeren Apogäum führt und die Effizienz verschlechtert. Außerdem verlagern zusätzliche Finnen den Massenschwerpunkt weiter nach hinten, was die Stabilitätsreserve reduziert, wenn nicht durch zusätzliches Frontgewicht kompensiert wird.

Aerodynamik Spitzenformen

Die Form der Raketenspitze hat großen Einfluss auf die Aerodynamik, insbesondere auf den Luftwiderstand und das Flugverhalten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Bei langsamen Flügen im Unterschallbereich sind rundlichere, stromlinienförmige Nasen (z.B. ogivale oder elliptische Spitzen) besonders vorteilhaft, da sie die Luft sanft verdrängen und somit den Druckwiderstand minimieren.

Im Überschallbereich ändern sich das Ganze. Hier dominieren Stoßwellen den Luftwiderstand und spitze, langgezogene Formen (z.B. Kegelnase, von Kármán-Profilen oder Haack-Profilen) sind vorteilhaft, da sie die Stoßwellen effizient ableiten und damit der Wellenwiderstand reduziert wird. Raketenspitzen sorgen für effiziente Strömungsführung und sind daher essenziell zu optimieren.

Zu berechnen ist der Luftwiderstand aus Luftdichte, Beschleunigung, Stirnfläche und Widerstandsbeiwert der hauptsächlich durch die Spitze bestimmt wird.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_d \cdot A$$

Andere Aerodynamikaspekte

Weitere wichtige Aspekte sind der asymmetrische Luftstrom bei z.B. Seitenwind oder einem (präferierten) schrägen Start, da die Rakete driften, kippen oder rotieren kann, falls nicht genug Stabilisierung vorliegt. Ein Launchrail ist daher essenziell. Wichtig ist auch das Einbeziehen von „Roll“.

Bei schräger Montierung der Finnen rotiert die Rakete um die Längsachse in einen „Drall“. Dieser kann zwar stabilisierend wirken, kann aber auch durch harmonisches Schwingen die Rakete aus der Stabilität reißen und Probleme bei der Sensorik verursachen.









Der „Aftcone“ der Rakete, als das Heck ist auch sehr bedeutend für das Flugverhalten, da ohne aerodynamische Optimierung ein starker Unterdruckbereich oder „Nachlauf“ hinter der Rakete entsteht, welcher einen signifikanten Widerstand mit sich zieht.

Weitere Einflüsse haben zum Beispiel Oberfläche der Rakete (sog. „Skin Friction“) durch Luftreibung, Übergänge zwischen Modulen oder Stufen (zum Beispiel durch Geometrieänderung) durch Turbulenzen und Verwirbelungen und das Verhältnis von Länge zu Durchmesser, da längere Raketen aerodynamisch durch weniger Richtungsänderung des Luftstroms wesentlich günstiger sind.

Wie könnte man die Wasserrakete optimieren. Fehlen der Startrampe wichtige Features?

Fallschirmauslegung

Für die Sinkgeschwindigkeit und die Fallschirm-Mindestgröße benötigen wir primär die Bremswirkung.

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°

Die Bremskraft berechnet sich laut Theo W. Knacke („Parachute Recovery Systems“) aus Luftwiderstandsbeiwert, der Fläche des Fallschirms, der Fluggeschwindigkeit und der Luftdichte. Eine Tabelle aus dem Buch beschreibt die unterschiedlichen Bauformen mit deren CW-Beiwert auf. Eine annähernde Berechnung ist wie folgt möglich.

$$F_{\text{brems}} = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

In unserem Falle beträgt c_w 0,75 bis 0,8

Durch Gleichsetzen mit der Formel für die Gewichtskraft kommt man auf die Formel für die Sinkgeschwindigkeit:

$$V_{\text{sink}} = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g}{A \cdot c_w \cdot \rho}}$$

Durch Einsetzen der Erwünschten Sinkgeschwindigkeit kann man die Fallschirmfläche/Durchmesser berechnen.

Die Schockbelastung lässt sich mithilfe des „Opening Force Coefficient“ C_x aus besagter Tabelle (Siehe Knacke S.5) einfach berechnen.

$$F_{\text{Schock}} = F_{\text{Brems}} \cdot C_x$$

In unserem Falle beträgt C_x ca. 1,7. Das heißt die entstehende Kraft bei Öffnung entspricht dem 1,7-fachen der Bremskraft.

Berechne den Durchmesser des Fallschirms, wenn die Rakete eine maximale Fallgeschwindigkeit von 5m/s bzw. 4m/s erreichen soll.

Fallschirmauswurf

Rechercheaufgabe:

Informiert dich in Einzelarbeit über die verschiedenen Methoden des Fallschirmauswurfes. Stellt Vor- und Nachteile im Team vor und legt euch auf eine Möglichkeit fest. Vergleicht dabei große Raketen, Modellraketen und Wasserraketen. Arbeitet für jeden Raketentyp die für euch beste Variante aus.

Bei unserer Wasserrakete haben wir uns für einen Mechanismus entschieden, der den Fallschirm beim Aufklappen der Spitze freigibt. Der Vorteil daran ist, dass die Spitze relativ kurz ist, da wir den Hohlraum der Spitze ausgenutzt wird.

Wassermenge Flasche

Die optimale Wassermenge in einer Flaschenrakete liegt typischerweise bei ca. $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ des Flaschenvolumens. In diesem Bereich entsteht das beste Verhältnis zwischen Schub und „Brenndauer“: Das Wasser wirkt als Reaktionsmasse und wird vom komprimierten Luftdruck ausgestoßen, wobei Schub erzeugt wird. Je mehr Wasser, desto größer die Masse zum Beschleunigen aber desto weniger Luft steht zur Verfügung, um Druck aufzubauen und Volumen zu expandieren. Umgekehrt bringt zu wenig Wasser zwar viel Gasvolumen, aber zu wenig Masse für effektiven Schub. Der Sweet Spot liegt meist bei ca. 35–40 % Füllstand, abhängig von Düsenform und Druck.

Zu viel Wasser kann sogar kontraproduktiv sein. Die Rakete wird schwer, beschleunigt langsamer und erreicht geringere Höhen, weil der Druck schnell nachlässt. Zu wenig Wasser führt zu kurzen Schubphasen mit geringem Impuls.

Wichtig ist, dass das Verhältnis zwischen komprimierbarem Gasraum und Ausstoßmasse im Gleichgewicht ist.

Massenbudget

Das Massenbudget einer Wasserrakete ermittelst du optimal, indem du zuerst die Masse der Hauptkomponenten festlegst: Flasche, Wasser, Luftdruck und Zusatzausrüstung wie Fallschirm, Verschluss oder Stabilisatoren. Wichtig ist, das Verhältnis zwischen Treibmittelmasse (Wasser) und Strukturmasse so zu optimieren, dass genug Wasser für Schub vorhanden ist, ohne die Rakete unnötig schwer zu machen. Dabei hilft die Faustregel, etwa 30–40 % des Flaschenvolumens mit Wasser zu füllen, während das Restvolumen mit komprimierter Luft gefüllt wird.

Um das optimale Massenbudget zu bestimmen, kannst du experimentell verschiedene Wasserfüllmengen und Gewichte der Zusatzelemente testen oder numerische Simulationen verwenden.

OpenRocket

OpenRocket ist eine kostenlose Open-Source-Software, mit der man Modellraketen entwerfen, simulieren und analysieren kann – noch bevor man sie baut. Eure Aufgabe ist es, die Wasserrakete nachzubauen und den Flug zu simulieren.

1. Design

Bau die Rakete bis auf ihre Bestandteile auseinander und versuche die Maße so exakt wie möglich zu übernehmen. Achte darauf, dass keine Sprünge zwischen Bauteilen sind. OpenRocket kann damit nicht so gut umgehen. Wiege die Teile einzeln und passe sie in OpenRocket (für jedes Element unter dem Reiter „Werte überschreiben“).

2. Analyse

Bei gebauter Rakete wird der Druckpunkt rot und der Schwerpunkt blau-weiß angezeigt. Vergleiche das mit den Grundprinzipien der Aerodynamik. Wie könnte man die Punkte optimieren? Versuche auch den Schwerpunkt der echten Rakete zu bestimmen. Warum könnte es dabei zu Abweichungen kommen?

3. Simulation

OpenRocket unterstützt nicht direkt die Simulation von Wasserraketen, sondern für Feststoffmotoren. Um trotzdem die Rakete zu simulieren, müsst ihr die Schubkurve (Datei mit .eng-Endung) in den Einstellungen importieren. Unter dem Reiter „Simulation“ kann man eine neue erstellen und exportieren. Speichert die Daten, um sie mit den echten Daten zu vergleichen.

Testen des Moduls

Nehmt euch das fertige Modul und überprüft, ob es wie gewünscht funktioniert. Beobachtet dabei insbesondere den Moment der Auslösung: Öffnet sich der Fallschirm genau dann, wenn ihr es erwartet habt? Überlegt euch mögliche Ursachen, wenn das Modul zu früh oder zu spät auslöst.

Mögliche Fehlerquellen könnten sein:

- Ungenaue Sensordaten (z. B. Rauschen oder Verzögerungen)
- Fehlerhafte Berechnung der Höhe oder des Höhenabfalls
- Falsche Referenzwerte im Code
- Verzögerungen durch den Servo
- Testet außerdem die Datenaufzeichnung auf der SD-Karte:
- Ist das Format korrekt? (z. B. CSV mit Kommas oder Semikolon getrennt)
- Stimmen die Einheiten? (z. B. Meter für Höhe, °C für Temperatur, hPa für Luftdruck)
- Sind die Messwerte in einer sinnvollen Größenordnung? (z. B. keine negativen Höhenwerte oder unrealistisch hohe Temperaturen)

Versucht, die aufgezeichneten Daten zu validieren:

- Ist der Verlauf der Höhe plausibel? Gibt es z. B. einen klar erkennbaren Anstieg beim Start und einen Abfall nach der höchsten Stelle?
- Entsprechen die Temperaturwerte etwa der Umgebungstemperatur?
- Verhält sich der Luftdruck physikalisch korrekt (z. B. sinkender Druck mit zunehmender Höhe)?

Diese Tests helfen euch, mögliche Fehler frühzeitig zu erkennen und die Funktion eures Systems zu verbessern.

Aufzeichnen der Flugdaten

Für die Test empfehlen wir die Finnen 1 und die ogive Spitze. Die Flasche sollte mit 500ml Wasser gefüllt sein und bis 5 bar Luftdruck.

Jetzt wird's spannend: Deine Rakete ist bereit für den Start – und dein Messmodul soll alle wichtigen Daten aufzeichnen! Höhe, Luftdruck, Temperatur und Bewegung geben dir spannende Einblicke in den Flugverlauf. Mit diesen Daten kannst du später genau analysieren, wann der höchste Punkt erreicht wurde, wie schnell die Rakete steigt – und ob der Fallschirm im richtigen Moment ausgelöst wurde.

Hier ein Tutorial, wie man den Fallschirm richtig faltet, dass er zuverlässig aufgeht.

<https://www.youtube.com/shorts/kGTpw6yevmc?feature=share>



Sicherheitshinweise

- Bevor du mit dem Start beginnst, beachte folgende Punkte:
- Luftpumpe prüfen: Achte darauf, dass die Luftpumpe eine genaue Anzeige hat. Die 5 Bar dürfen nicht überschritten werden.
- Zustand der Flasche prüfen: nach einigen Flügen können sich Risse am Hals der Flasche bilden. Außerdem wird die Flasche zunehmend dünner. Wechsle die Flasche nach 10 Starts aus.
- Sicherheitsabstand einhalten: Alle Zuschauer und Beteiligten müssen beim Start mindestens 5 m Abstand halten.
- Schutzbrille tragen: Bei Arbeiten mit Druckluft ist eine Schutzbrille Pflicht.
- Modul richtig befestigen: Das Modul muss mit der Flasche stabil verklebt sein, da diese sonst getrennt herunterfallen könnten.
- Startrampe nur auf freiem Gelände verwenden: Kein Start in der Nähe von Gebäuden, Straßen oder Stromleitungen. Empfehlung hierzu ist einer der kurzen Seiten eines Sportplatzes und leicht in die andere Richtung ausrichten. (maximal 20 Grad von der Senkrechten)
- Nie auf Menschen oder Tiere zielen: Die Rakete ist kein Spielzeug!
- Niemals die Rakete versuchen zu fangen.

Analyse der Daten

Aufgabe: Auswertung der Flugdaten mit Excel

Für die Auswertung der Daten könnt ihr für das Programm eure Wahl entscheiden. Bei Vorerfahrung kann Python mit dem Modul MathPlotLib eine Möglichkeit sein. Für den ersten Umgang mit Daten empfiehlt sich Excel.

Auswertung mit Excel:

1. CSV-Datei öffnen

- Starte Excel
- Öffne deine log_XXXX.csv-Datei
- Spaltenüberschriften umbenennen:
 - Zeit [s], Höhe [m], Beschleunigung [g], Luftdruck [hPa], Temperatur [°C] etc
- Achte auf richtige Schreibweise (Excel verwendet Kommas für die Nachkommastellen, in der CSV Datei sind es Punkte – das Tool Suchen und Ersetzen kann helfen)

2. Höhe über Zeit – Diagramm erstellen

- Spalten „Zeit [s]“ und „Höhe [m]“ markieren
- Einfügen → Liniendiagramm
- Flugverlauf sichtbar machen
- Arbeite aus den Daten folgende Werte heraus:
 - Höchste Beschleunigung
 - Apogäum
 - Flugdauer
 - Maximale Geschwindigkeit
 - Sinkgeschwindigkeit
- Kann man daraus die Formel für den Senkrechten Wurf ausarbeiten?
- Bestimme den c_w Wert des Fallschirms (Masse, Luftdichte und Fläche gegeben)
- Bestimme die Schubkurve Wasserrakete – wie unterscheidet sie sich von großen Raketen bzw. Modellraketen mit Schwarzpulvermotor

Daten präsentieren

Nachdem du deine Flugdaten ausgewertet hast, geht es nun darum, die Ergebnisse klar und verständlich darzustellen. Eine gute Präsentation hilft dabei, deine Messungen nachvollziehbar zu machen und besondere Erkenntnisse hervorzuheben.

Übersichtliche Darstellung

- Erstelle eine strukturierte Auswertung in Excel oder PowerPoint.
- Nutze Tabellen für Werte wie Apogäum, Flugdauer, Maximalgeschwindigkeit etc.
- Verwende Diagramme, z. B.:
 - o Höhe über Zeit (für Flugkurve)
 - o Geschwindigkeit über Zeit
 - o Schubkurve
 - o Beschleunigung über Zeit

Hebe Besonderheiten hervor

- Zeige deutlich, wo das Apogäum liegt
- Benenne Stellen mit besonderer Beschleunigung oder auffälligem Flugverhalten.
- Wenn der Fallschirm ausgelöst wurde: Markiere diesen Zeitpunkt (z. B. durch eine vertikale Linie im Diagramm).
- Was ist bei euren Daten besonders
- Gab es Probleme bei der Auswertung

Wenn jede Gruppe die gleichen Daten vorstellt, kann es schnell langweilig werden. Konzentriert euch auf die Erfolge oder Probleme, die ihr das Projekt hinweg hatten.

Interpretation

Erkläre mit eigenen Worten:

- Was passiert wann?
- Warum sieht die Kurve so aus?
- Welche Phase des Flugs erkennst du (Start, Steigflug, Apogäum, Sinkflug)?
- Vergleiche berechnete Werte mit theoretischen Erwartungen (z. B. Höhe beim senkrechten Wurf).

Kreative Präsentationsform

- Erstelle ein kurzes Poster, ein Video mit Flug- und Datenanalyse oder einen digitalen Bericht.
- Baue Screenshots deiner Diagramme ein.
- Ergänze ein Fazit: Was würdest du beim nächsten Mal anders machen?

Ziel ist nicht nur, die Daten zu zeigen – sondern auch zu erklären, was sie bedeuten und was du daraus gelernt hast.