

# Facharbeit der Kollegstufe

Abiturjahrgang 2008/2010

Kurs: \_\_\_\_\_

Kursleiter: \_\_\_\_\_

Verfasser: \_\_\_\_\_

Thema: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Abgabetermin: \_\_\_\_\_

Note: \_\_\_\_\_

Punkte: \_\_\_\_\_

Dem Direktorat vorgelegt am: \_\_\_\_\_

Punkte eingetragen am: \_\_\_\_\_

Unterschrift des Kursleiters: \_\_\_\_\_

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen der Raketenphysik</b>	<b>4</b>
2.1	Das Rückstoßprinzip . . . . .	4
2.2	Die Raketengrundgleichung . . . . .	7
2.3	Das Stufenprinzip . . . . .	12
2.4	Technische Umsetzungen des Raketenprinzips . . . . .	13
2.4.1	Feststoffraketen . . . . .	13
2.4.2	Flüssigkeitsraketen . . . . .	14
2.4.3	Drucklufttrakete . . . . .	15
2.4.4	Wasserraketen . . . . .	16
2.5	Stabilität . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Bau und Erprobung einer Wasserrakete</b>	<b>19</b>
3.1	Konstruktion der Rakete . . . . .	19
3.1.1	Prinzipielle Umsetzung . . . . .	19
3.1.2	Bau der Startrampe . . . . .	19
3.1.3	Bau des Raketenkörpers . . . . .	21
3.1.4	Bergungssystem . . . . .	23
3.1.5	Fertige Rakete . . . . .	23
3.2	Erprobung der Rakete . . . . .	24
3.2.1	Startvorbereitungen . . . . .	24
3.2.2	Flug . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Ausblick</b>	<b>25</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>26</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>27</b>

# 1 Einführung

Die Raketentechnik ist der Menschheit schon seit vielen Jahrhunderten bekannt. Der erste überlieferte Raketenstart ist der Einsatz sogenannter Feuerpfeile durch die Chinesen im Krieg gegen die Mongolen im Jahr 1232 in der Schlacht von Kai-Feng. Diese Feuerpfeile bestanden aus einer mit Schwarzpulver gefüllten Röhre, an der ein Stab zur Stabilisierung befestigt war. Durch Kriege wurde das Prinzip der Rakete weitergereicht, so dass die Idee auch nach Europa getragen wurde. Im Jahr 1555 erfolgte der erste dokumentierte Start einer Rakete im rumänischen Hermannstadt.

Die hauptsächliche Raketenforschung beginnt allerdings erst im 20. Jahrhundert und wird vor allem durch die Vision der Weltraumfahrt vorangetrieben. 1903 gelang dem Russen Konstantin Ziolkowski als erstem die Herleitung der Raketengrundgleichung und damit die Grundlage zur mathematischen Beschreibung von Raketen. Bedeutend ist ebenfalls der amerikanische Raketenpionier Robert Goddard, der 1926 die erste Rakete mit Flüssigkeitsraketenantriebwerk starten konnte. Auf deutscher Seite gelangte Hermann Oberth unabhängig von Ziolkowski und Goddard zu ähnlichen Ergebnissen.

Ziel dieser Facharbeit ist die Erklärung des Raketenprinzips und die Herleitung der erstmals von Ziolkowskis entdeckten Raketengrundgleichung. Des Weiteren soll zur Veranschaulichung eine Wasserrakete gebaut und erprobt werden.

## 2 Theoretische Grundlagen der Raketophysik

### 2.1 Das Rückstoßprinzip

Fortbewegung basiert im Allgemeinen auf dem Rückstoßprinzip, das in Newtons drittem Gesetz formuliert ist. Dieses besagt, dass Kräfte immer paarweise auftreten, d.h. es gibt zu jeder Kraft von einem Körper A auf einen Körper B eine genau gleich große, entgegengerichtete Kraft von Körper B auf Körper A:

$$F_{A \rightarrow B} = -F_{B \rightarrow A} \quad (2.1)$$

Dieses Prinzip wird auch Reaktionsprinzip genannt, kurz: „actio gleich reactio“. Daraus folgt, dass Fortbewegung nur möglich ist, wenn es eine Masse gibt, von der man sich abstoßen kann. Das bedeutet, man übt auf einen Körper eine Kraft aus und wird dann aufgrund der Gegenkraft „weggedrückt“. Vor den Arbeiten der Raketenpioniere dachte man lange Zeit, dass eine Rakete die Luft benötigen würde, um sich von ihr abzustoßen. Dieses Missverständnis konnte Robert Goddard jedoch widerlegen, indem er eine Pistole mit leerer Patrone in einer evakuierten Kammer abfeuerte. Die Pistole prallte in dem Vakuum genauso zurück wie unter normalem Luftdruck. Durch weitere Tests fand er heraus, dass die Rakete im Vakuum aufgrund des fehlenden Luftwiderstandes, der unter Normalbedingungen abbremsend wirkt, sogar noch besser flog. Eine Rakete benötigt keine Masse, von der sie sich abstößt, weil sie selber eine Masse mitführt, die sie ausstößt, nämlich ihren Treibstoff. Man kann sich dieses Prinzip am besten anhand einer Modellvorstellung klarmachen:

Eine Person steht in der horizontalen Ebene auf einem ruhenden Wagen, der reibungsfrei beweglich ist, Abb. 2.1. Der Wagen und die Person haben zusammen die Masse  $m_L$ . Außerdem befinden sich auf dem Wagen eine Anzahl  $N$  an Steinen, die zusammen die

Masse  $m_T$  besitzen. Die Person wirft nun nacheinander Steine mit der gleichbleibenden Geschwindigkeit  $v_{rel}$  relativ zum Wagen in negativer x-Richtung horizontal vom Wagen weg. Um den Stein auf die Geschwindigkeit  $v_{rel}$  zu beschleunigen, muss eine Kraft  $F_T$  aufgewendet werden. Aufgrund des Reaktionsprinzips wirkt eine gleich große, entgegengesetzte Kraft  $F_S$  auf den Wagen, die ihn in positiver x-Richtung beschleunigt. Der Wagen wird also genau nach demselben Prinzip wie eine Rakete in Bewegung versetzt. Das Reaktionsprinzip basiert auf der Impulserhaltung, die fordert, dass die Summe aller Kräfte in einem abgeschlossenen System null sein muss. Daher gilt beim n-ten Abwurf:

$$m_{n-1} \cdot \vec{v}_{n-1} = m_n \cdot \vec{v}_n + \frac{m_T}{N} \cdot \vec{v}_T \quad (2.2)$$

Da der Beobachter den Vorgang vom ruhenden System aus betrachtet, gilt für die Geschwindigkeit der Steine:  $\vec{v}_T = \vec{v}_{rel} + \vec{v}_n$ . Man beachte die Vorzeichen der Geschwindigkeitsvektoren!

Außerdem gilt für die Masse  $m$  des Wagens:  $m_n = m_{n-1} - \frac{m_T}{N}$ .

$$m_{n-1} \cdot \vec{v}_{n-1} = \left(m_{n-1} - \frac{m_T}{N}\right) \cdot \vec{v}_n + \frac{m_T}{N} \cdot (\vec{v}_{rel} + \vec{v}_n) \quad (2.3)$$

Durch Ausmultiplizieren und umformen ergibt sich:

$$\Delta \vec{v} := \vec{v}_n - \vec{v}_{n-1} = -\frac{\frac{m_T}{N}}{m_{n-1}} \cdot \vec{v}_{rel} \quad (2.4)$$



Abbildung 2.1: Modellvorstellung zum Raketenantrieb

Mit  $m_0 = m_L + m_T$  ergibt sich folgender Algorithmus:

$$m_n = m_{n-1} - \frac{m_T}{N} \quad (2.5)$$

$$\Delta \vec{v} = -\frac{\frac{m_T}{N}}{m_{n-1}} \cdot \vec{v}_{rel} \quad (2.6)$$

$$\vec{v}_n = \vec{v}_{n-1} + \Delta \vec{v} \quad (2.7)$$

Der Algorithmus endet, wenn  $m_n$  gleich  $m_L$  ist, d.h. wenn alle Steine abgeworfen wurden. Dann ist auch die Endgeschwindigkeit  $v_B$  erreicht. Mit Hilfe dieser Formeln kann man sich drei Besonderheiten dieses Antriebs bewusst machen. Erstens wird der Körper, in diesem Fall der Wagen, noch während der Bewegungsphase beschleunigt. Das bedeutet, dass eine Rakete im Gegensatz zu einem Geschoss, das einmal beschleunigt wird und dann den Wurfgesetzen unterliegt, auch während der Flugphase noch an Geschwindigkeit zunimmt. Zweitens folgt aus Gleichung (2.6), dass die Beschleunigung zunimmt, d.h. die Geschwindigkeitszunahme wächst an, da die Masse des zu beschleunigenden Körpers bei jedem Abwurf abnimmt. Eine dritte Erkenntnis erlangt man, wenn man die Endgeschwindigkeit  $v_B$  für ein konkretes Zahlenbeispiel in Abhängigkeit von  $N$  darstellt, dazu Diagramm 1. Die Werte für dieses Diagramm sind  $m_0 = 100$  kg,  $m_T = 150$  kg und  $\vec{v}_{rel} = -10 \frac{m}{s}$ .

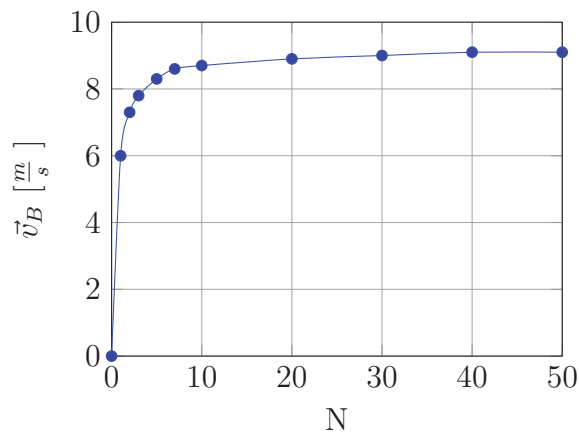


Abbildung 2.2:  $N$ - $\vec{v}_B$ -Diagramm

Man sieht, dass die Endgeschwindigkeit  $\vec{v}_B$  mit der Anzahl an Steinen zunimmt, d.h. die Endgeschwindigkeit ist umso größer, je kleiner die Portionen sind, in die die Treibstoff-

masse eingeteilt ist. Außerdem strebt sie offensichtlich gegen einen Grenzwert für sehr kleine Portionen.

## 2.2 Die Raketengrundgleichung

### Herleitung

Nachdem im vorherigen Kapitel das Raketenprinzip anhand einer Modellvorstellung diskutiert wurde, soll nun eine Gleichung zur quantitativen Beschreibung der Bewegung einer Rakete hergeleitet werden. Dazu wird eine Rakete im gravitationsfreien Vakuum betrachtet, Einflüsse der Gravitation und der Reibung werden also zunächst nicht in Betracht gezogen. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die auftretenden Geschwindigkeiten weit unterhalb der Lichtgeschwindigkeit liegen, was aber für heutige Raketen erfüllt ist. Des Weiteren soll die Ausstoßgeschwindigkeit  $v_{rel}$  des Treibstoffs konstant sein. Als Ansatz dient wieder die Impulserhaltung.

### Bezeichnungen:

- $m_0$ : Startmasse der Rakete
- $m(t)$ : Masse der Rakete zur Zeit  $t$
- $\vec{v}_{rel}$ : Ausstoßgeschwindigkeit relativ zur Rakete
- $\vec{v}_0$ : Raketengeschwindigkeit vor dem Ausstoß
- $\vec{v}(t)$ : Raketengeschwindigkeit zur Zeit  $t$
- $\vec{v}_T$ : Ausstoßgeschwindigkeit relativ zum ruhenden Beobachter

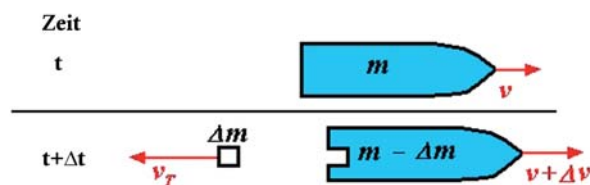


Abbildung 2.3: Impulserhaltung beim Raketenprinzip

Zunächst wird der Gesamtimpuls zur Zeit  $t$  und zur Zeit  $t + \Delta t$  bestimmt.

$$\vec{p}(t) = m(t) \cdot \vec{v}(t) \quad (2.8)$$

$$\vec{p}(t + \Delta t) = \underbrace{\Delta m \cdot \vec{v}_T}_{\text{Impuls des Treibstoffs}} + \underbrace{m(t + \Delta t) \cdot \vec{v}(t + \Delta t)}_{\text{Impuls der Rakete}} \quad (2.9)$$

Im nächsten Schritt werden alle Größen zur Zeit  $t + \Delta t$  durch die Zustandsänderung gegenüber der Zeit  $t$  ausgedrückt. Außerdem gilt für die Ausstoßgeschwindigkeit  $\vec{v}_T$ :

$$\vec{v}_T = \vec{v}_{rel} + \vec{v}(t + \Delta t) = \vec{v}_{rel} + \vec{v}(t) + \Delta \vec{v} \quad (2.10)$$

$$\vec{p}(t + \Delta t) = \Delta m \cdot (\vec{v}_{rel} + (\vec{v}(t) + \Delta \vec{v})) + (m(t) - \Delta m) \cdot (\vec{v}(t) + \Delta \vec{v}) \quad (2.11)$$

Danach wird die Impulsänderung berechnet, die durch die Differenz der Summe der Impulse zur Zeit  $t + \Delta t$  und der Summe der Impulse zur Zeit  $t$  entsteht, d.h. (2.11) - (2.8)

$$\Delta \vec{p} = [\Delta m \cdot (\vec{v}_{rel} + (\vec{v}(t) + \Delta \vec{v})) + (m(t) - \Delta m) \cdot (\vec{v}(t) + \Delta \vec{v})] - m(t) \cdot \vec{v}(t) = \Delta m \cdot \vec{v}_{rel} + m(t) \cdot \Delta \vec{v} \quad (2.12)$$

Laut Newtons zweitem Gesetz gilt für die äußere Kraft  $\vec{F}_A = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ . Da äußere Einflüsse wie Gravitation und Luftreibung vernachlässigt wurden, gilt außerdem  $\vec{F}_A = 0$ .

$$\vec{F}_A = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot \vec{v}_{rel} + m(t) \cdot \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = 0 \quad (2.13)$$



---

Für ein infinitesimales  $\Delta t$  kann man außerdem die Differenzenquotienten durch die Differentialquotienten ersetzen. Daraus folgt:

$$m(t) \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{v}_{rel} \cdot \frac{dm}{dt} \quad (2.14)$$

Der Term  $\frac{dm}{dt} \cdot \vec{v}_{rel}$  beschreibt die Kraft auf die ausgestoßene Masse. Aufgrund des Wechselwirkungsprinzips folgt damit für die Schubkraft  $\vec{F}_S$ , die die Rakete beschleunigt:

$$\vec{F}_S = \frac{-dm}{dt} \cdot \vec{v}_{rel} \quad (2.15)$$

Multipliziert man (2.14) mit  $dt$  und teilt durch  $m(t)$  ergibt sich:

$$d\vec{v} = -\vec{v}_{rel} \cdot \frac{1}{m(t)} \cdot dm \quad (2.16)$$

Gleichung (2.16) beschreibt die infinitesimal kleine Geschwindigkeitsänderung bei infinitesimal kleiner Massenänderung. Durch ein Integral vom Zeitpunkt  $t_0$  bis zum Zeitpunkt  $t$  erhält man eine Gleichung, die den Geschwindigkeitszuwachs in Abhängigkeit von der Massenänderung angibt. Anschaulich ausgedrückt bedeutet das, dass die Geschwindigkeitsänderungen für jeden Zeitpunkt zwischen  $t_0$  und  $t$  aufaddiert werden.

$$\int_{t_0}^t d\vec{v} = -\vec{v}_{rel} \cdot \int_{t_0}^t \frac{1}{m(t)} \cdot dm \quad (2.17)$$

Das Integral der Funktion  $\frac{1}{x}$  gehört zu den Standardintegralen. Die allgemeine Lösung lautet  $\ln(x) + c$ . Damit ergibt sich:

$$\vec{v}(t) - \vec{v}_0 = -\vec{v}_{rel} \cdot (\ln(m(t)) - \ln(m_0)) = -\vec{v}_{rel} \cdot \ln\left(\frac{m(t)}{m_0}\right) \quad (2.18)$$

Die Geschwindigkeit  $\vec{v}_0$  hat einen Betrag von 0, da die Rakete zum Zeitpunkt  $t_0$  auf der Startrampe ruht. Außerdem wird das Logarithmusgesetz  $\ln\left(\frac{a}{b}\right) = -\ln\left(\frac{b}{a}\right)$  ausgenützt, um das Minuszeichen zu beseitigen.

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_{rel} \cdot \ln\left(\frac{m_0}{m(t)}\right) \quad (2.19)$$

Formel (2.19) wird auch als Raketengrundgleichung bezeichnet. Sie gilt für jeden Raketenantrieb, unabhängig davon, wie die Geschwindigkeit des ausgestoßenen Treibstoffs erzeugt wird.

### Praxisbezug

Die für die Raketengrundgleichung vorgenommenen Näherungen stimmen im Vakuum des Weltraums am besten. Für Raketenstarts auf der Erde muss die Formel um die Erdanziehungskraft ergänzt werden. Für niedrige Höhen kann die Fallbeschleunigung  $g$  als konstant angenommen werden. Der Einfachheit halber soll betragsmäßig gerechnet werden. Daraus folgt:

$$v(t) = v_{rel} \cdot \ln\left(\frac{m_0}{m(t)}\right) - g \cdot t \quad (2.20)$$

Nachdem der gesamte Treibstoff verbraucht wurde, entspricht  $m(t)$  der Leermasse  $m_L$  der Rakete. Das bedeutet, dass die Rakete zum Brennschlusszeitpunkt  $t_B$  die Brennschlussgeschwindigkeit  $v_B$  erreicht hat.

$$v_B = v_{rel} \cdot \ln\left(\frac{m_0}{m_L}\right) - g \cdot t_B \quad (2.21)$$

## Spezifischer Impuls

Der spezifische Impuls ist eine wesentliche Kenngröße von Raketenantrieben. Er ist definiert als die Änderung des Impulses (Kraft mal Zeit) pro Masseneinheit des Treibstoffs. Für eine konstante Schubkraft  $F_S$  gilt:

$$I_{sp} = \frac{F_s \cdot \Delta t}{\Delta m} \quad (2.22)$$

Für die Annahme einer konstanten Schubkraft kann man die Differentialquotienten in Gleichung (2.15) auch durch die Differenzenquotienten ersetzen. Damit ergibt sich:

$$\vec{F}_s = -\frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot \vec{v}_{rel} \quad (2.23)$$

Da nun betragsmäßig gerechnet werden soll, fällt das Minus weg. Aus den Formeln (2.23) und (2.22) folgt daher:

$$I_{sp} = v_{rel} \quad (2.24)$$

Der spezifische Impuls ist also betragsgleich mit der Austrittsgeschwindigkeit des Treibstoffs relativ zur Rakete.

Aufgrund seiner Definition ist er ein Maß für die Effektivität eines Antriebs. Ein spezifischer Impuls von  $2000 \frac{m}{s}$  bedeutet zum Beispiel, dass ein kg dieses Treibstoffs eine Impulsänderung von 2000 Ns bewirken kann. Das gilt sowohl für ein Triebwerk, das innerhalb einer Sekunde eine Schubkraft von 2000 N erzeugt und dabei 1 kg Treibstoff verbraucht, als auch für ein Triebwerk, das für 10 Sekunden eine Schubkraft von 20 N erzeugt und dabei 0,1 kg Treibstoff verbraucht.

## 2.3 Das Stufenprinzip

Um in eine Erdumlaufbahn einzutreten, müssen Raketen mindestens die erste kosmische Geschwindigkeit von ca.  $7,8 \frac{km}{s}$  erreichen. Jedoch kann eine einzelne Rakete eine solch hohe Geschwindigkeit nicht erreichen. Der Ursache hierfür liefert die Raketen- grundgleichung. Einerseits ist die effektive Ausstoßgeschwindigkeit  $v_{rel}$  für chemische Raketen auf ca.  $4500 \frac{m}{s}$  begrenzt. Andererseits kann eine Rakete wegen der technischen Umsetzung des Antriebs und um eine stabile Struktur zu gewährleisten nicht nur aus Treibstoff bestehen. Das bedeutet, dass Massenverhältnis  $\frac{m_0}{m_L}$  nicht beliebig groß gewählt werden kann. Eine Lösung, um dennoch höhere Geschwindigkeiten zu erreichen und damit größere Nutzlasten transportieren zu können, ist das Stufenprinzip. Durch Teilung der Raketen in mehrere Stufen ist es möglich, höhere Geschwindigkeiten zu erreichen. Dazu ein Beispiel: Es werde eine zweistufige Rakete angenommen bei der die einzelnen Brennstufen zu jeweils 90 % aus Treibstoff bestehen:

Tabelle 2.1: Beispiel Mehrstufenrakete

Stufe	Startmasse $m_0$ in [kg]	Leermasse $m_L$ in [kg]	Ausstoßge- schwindigkeit $v_{rel}$ in $\frac{m}{s}$
1. Stufe	$m_{01}=200000$	$m_{L1}=20000$	4000
2. Stufe	$m_{02}=40000$	$m_{L2}=4000$	4000
Nutzlast	$m_{03}=5000$		

Die Geschwindigkeit zum Brennschluss der ersten Stufe berechnet sich aus der Raketen- grundgleichung:

$$v_{B1} = v_{rel} \cdot \ln \left( \frac{m_{01} + m_{02} + m_{03}}{m_{L1} + m_{02} + m_{03}} \right) \approx 5300 \frac{m}{s} \quad (2.25)$$

Zur Berechnung der Brennschlussgeschwindigkeit nach der zweiten Stufe beachte man Gleichung (2.18). Sie besagt, dass bei einem Raketenstart die Anfangsgeschwindigkeit zur Geschwindigkeitsdifferenz durch den Raketenantrieb addiert wird. Damit ergibt sich für die Brennschlussgeschwindigkeit  $v_{B2}$ :

$$v_{B2} = v_{B1} + v_{rel} \cdot \ln \left( \frac{m_{02} + m_{03}}{m_{L2} + m_{03}} \right) \approx 11700 \frac{m}{s} \quad (2.26)$$

Zum Vergleich berechnet man ebenfalls die Geschwindigkeit einer einzigen Raketenstufe derselben Gesamt- und Treibstoffmasse:

$$v_{Bges} = v_{rel} \cdot \ln \left( \frac{m_{01} + m_{02} + m_{03}}{m_{L1} + m_{02} + m_{03}} \right) \approx 8500 \frac{m}{s} \quad (2.27)$$

Man kann also erkennen, dass es günstiger ist, Raketen in mehrere Stufen einzuteilen. Ein Grund hierfür wird klar, wenn man sich bewusst macht, dass beim Stufenprinzip zur Zündung der zweiten Stufe die Leermasse der ersten Stufe abgeworfen wird. Damit muss der Antrieb der zweiten Stufe eine geringere Masse beschleunigen, wodurch eine höhere Endgeschwindigkeit erreicht werden kann.

## 2.4 Technische Umsetzungen des Raketenprinzips

Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen technischen Möglichkeiten zur Umsetzung des Raketenprinzips. Im Folgenden sollen fünf verschiedene heute noch in Raumfahrt, beim Modellraketen- und Amateurraketenbau gebräuchliche Methoden dargestellt werden.

### 2.4.1 Feststoffraketen

Der Raketenmotor einer Feststoffrakete besteht aus einem Treibsatzgehäuse und einer Expansionsdüse. Im Treibsatzgehäuse befindet sich ein festes Gemisch aus Brennstoff und Oxidator. Nach der Zündung reagieren Brennstoff und Oxidator kontinuierlich, bis die Rakete ausgebrannt ist. Dabei entsteht in der Brennkammer ein Druck von bis zu 100 bar, durch den die bei der Verbrennung entstehenden Gase ausgestoßen werden. Durch den Ausstoß der Verbrennungsgase wird der Schub erzeugt.

Feststoffraketen bieten einige Vorteile gegenüber anderen Systemen. Der Treibstoff ist aufgrund des festen Zustandes leicht lagerbar und einfach zu handhaben. Außerdem sind Feststoffraketen zuverlässig und leicht herzustellen. Der Nachteil liegt in der vergleichsweise geringen Ausstoßgeschwindigkeit, was einen niedrigeren spezifischen Impuls bedeutet, weswegen sie ihren Schub durch einen hohen Treibstoffverbrauch erzeugen müssen. Dies bedingt eine vergleichsweise kürzere Brenndauer. Des Weiteren besteht das gesamte Innere einer Feststoffrakete aus einer Brennkammer. Deswegen werden stabile, schwere Materialien benötigt, um eine ausreichende Beständigkeit gegenüber Druck und Hitze zu gewährleisten, was bei größeren Triebwerken ein schlechtes Verhältnis von Voll- zu Leermasse bewirkt.

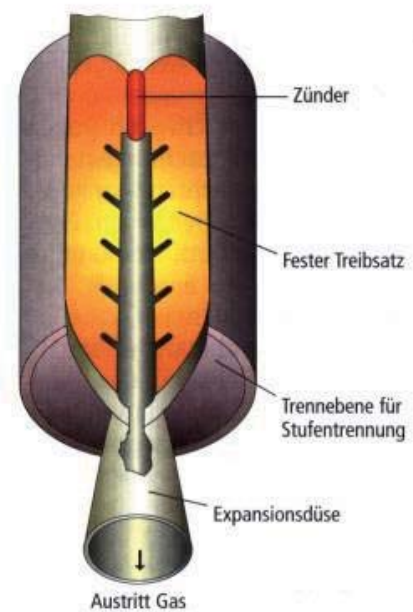


Abbildung 2.4: Prinzipdarstellung Feststoffrakete

Feststoffraketen haben heute noch einen vielfältigen Einsatzbereich, da durch unterschiedliche Treibstoffgemische sehr unterschiedliche spezifische Impulse  $I_{sp}$  erreicht werden können. Einerseits werden sie bei Trägerraketen als Booster eingesetzt, d.h. als zusätzlich montierte Raketen, die die Schubkraft erhöhen und nach Brennschluss abgeworfen werden. Andererseits kommen Feststofftreibsätze oft in Modellraketen zum Einsatz, meist mit Schwarzpulver als Brennstoff. Die bekanntesten Feststoffraketen sind dabei die Silvesterraketen.

## 2.4.2 Flüssigkeitsraketen

Bei einem Flüssigkeitsraketenantriebwerk besteht der Treibstoff aus zwei flüssigen Komponenten. Der Brennstoff (z.B. Kerosin oder verflüssigter Wasserstoff) und der Oxidator (meist verflüssigter Sauerstoff) werden in zwei unterschiedlichen Behältern gelagert. Beim Start der Rakete werden die beiden Stoffe von Pumpen in die Brennkammer befördert, wo das Gemisch gezündet wird. Die Reaktion läuft dann selbstständig weiter, wobei Gase mit Temperaturen von mehreren Tausend Grad und einem Druck von 200

bis 300 bar entstehen. Ein mit Wasserstoff und Sauerstoff betriebenes Raketentriebwerk kann einen spezifischen Impuls  $I_{sp}$  von bis zu  $4600 \frac{m}{s}$  erreichen.

Die Vorteile des Flüssigkeitsrakentriebwerks sind vor allem die effiziente Nutzung des Treibstoffs und die sehr hohe Schubkraft. Des Weiteren wird die Rakete erst kurz vor dem Start betankt, d.h. sie kann leer zum Startplatz transportiert werden, so dass sie leichter ist und keine Explosionsgefahr während des Transports besteht. Außerdem ist der Schub eines Flüssigkeitsrakentriebwerks einfacher regulierbar und das Triebwerk wiederzündbar. Im Übrigen verbrennt die am meisten eingesetzte Treibstoffkombination von verflüssigtem Wasserstoff und verflüssigtem Sauerstoff zu Wasser, womit der Antrieb umweltschonend ist. Der Nachteil eines Flüssigkeitsrakentriebwerks ist, dass isolierte Tanks und aufwendige Pump- und Kühlsysteme benötigt werden. Flüssigkeitsraketen sind daher kostenintensiver, komplexer und damit auch fehleranfälliger als Feststoffraketen. Zudem erhöht sich das Gefahrenpotential, da durch Lecks hochexplosive Gase austreten könnten.

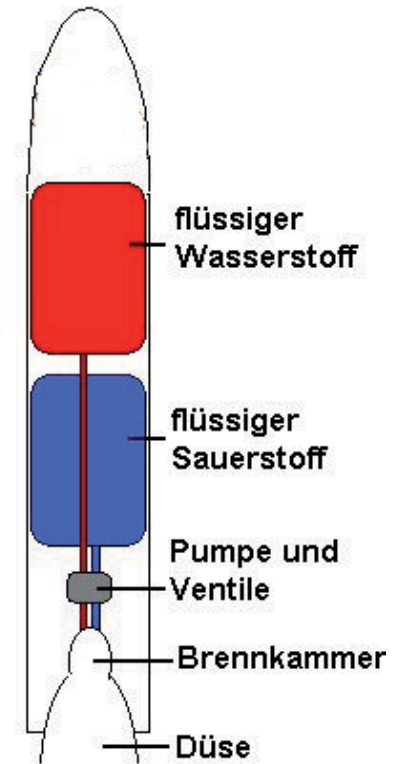


Abbildung 2.5: Prinzipdarstellung Flüssigkeitsrakete

Das Haupteinsatzgebiet von Flüssigkeitsraketen ist heute die moderne Raumfahrt aufgrund der enormen Schubentwicklung eines Flüssigkeitsraketenantriebs. Auch die Ariane 5 fliegt mit Hilfe dieses Antriebs, um nur ein Beispiel zu nennen.

### 2.4.3 Druckluftrakete

Das Prinzip einer Druckluftrakete ist sehr einfach. Der Antrieb setzt sich nur aus einer Druckkammer und einer Düse zusammen. Mit Hilfe einer Luftpumpe wird in der Druckkammer ein Überdruck erzeugt. Nach Öffnen des Ventils strömt die Luft aufgrund der

Expansion des unter Druck stehendes Gases durch die Düse mit der Ausstoßgeschwindigkeit  $v_{rel}$  aus und erzeugt so den Schub. Die Antriebsenergie wird hierbei in physikalischer Form statt wie bei den bisherigen Systemen in chemischer Form mitgeführt.

Drucklufttraketen sind nur in der Lage sehr niedrige Höhen zu erreichen und werden meist nur zur Veranschaulichung des Raketenprinzips gebaut.

#### 2.4.4 Wasserraketen

Eine Wasserrakete funktioniert nach einem ähnlichen Prinzip wie die Lufttrakete. Auch ihr Antrieb besteht nur aus einer Druckkammer und einer Düse. Der Unterschied besteht darin, dass eine Wasserrakete neben der Druckluft auch mit Wasser gefüllt ist, das sich in der Startposition aufgrund seiner größeren Dichte am Boden der Druckkammer, d.h. an der Düse sammelt. Nach dem Öffnen des Ventils wird das Wasser durch die Ausdehnung der Druckluft ausgestoßen, wodurch der Schub erzeugt wird. Zwar sinkt durch das Wasser das Volumen, das zur Aufnahme der Druckluft und damit zur Energiespeicherung zur Verfügung steht, allerdings erhöht sich der Massendurchsatz  $\frac{dm}{dt}$  enorm, was zu einer drastisch gesteigerten Schubkraft führt, vgl. Formel (2.15) auf Seite 9. Auch bei der Wasserrakete wird die Antriebsenergie in physikalischer Form mitgeführt.

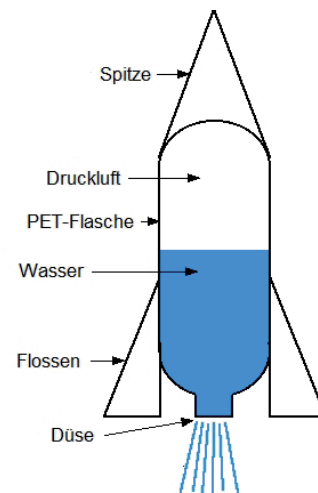


Abbildung 2.6: Prinzipdarstellung Wasserrakete

Wasserraketen sind sehr beliebt zur Demonstration des Raketenprinzips, da sie relativ leicht aus PET-Flaschen hergestellt werden können. Außerdem gibt es unter Raketenmodellbauern eine Gruppe, die sich intensiver mit Wasserraketen beschäftigt und dabei Modelle entwickelt, die aus einfachen Materialien bestehen und Höhen von 100 m und mehr erreichen können.



## 2.5 Stabilität

Beim Anblick einer im Wind startenden Rakete stellt sich die Frage, warum diese nicht durch den Wind gedreht wird und trotzdem ziemlich exakt weiter ihre gerade Flugbahn verfolgt. Der Grund hierfür liegt im Verhältnis von Schwerpunkt und Druckpunkt. Der Schwerpunkt ist der Punkt eines Körpers, in dem man sich seine Gesamtmasse konzentriert vorstellen kann. Gleichzeitig verlaufen auch die Achsen, um die sich ein frei gelagerter Körper bei Krafteinwirkung dreht, durch den Schwerpunkt. Der Druckpunkt steht in der Strömungslehre für den Punkt, an dem sich alle an einem Flügelprofil wirksamen Luftkräfte zusammenfassen lassen.

Stellt sich nun eine Rakete leicht schräg, werden alle Raketenteile (Nase, Rohr, Flossen) angeströmt und eine Kraft wirkt auf sie. Die resultierende all dieser Teilkräfte greift im Druckpunkt an. Befindet sich der Druckpunkt an der Rakete vor dem Schwerpunkt, entsteht dadurch ein Moment, das die Rakete nach hinten dreht, wodurch ein unkontrollierbarer Flug resultieren würde. Befände sich der Druckpunkt allerdings hinter dem Schwerpunkt, bewirkt die resultierende Kraft ein Moment, das die Rakete wieder in Flugrichtung dreht. Eine Rakete würde sich im Übrigen aufgrund dieses Sachverhalts nicht in den Wind drehen, da die Vorwärtsgeschwindigkeit deutlich größer ist als die der zu erwartenden Seitenwinde.

Aus der Erkenntnis, dass sich der Druckpunkt einer Rakete immer hinter dem Schwerpunkt befinden muss, lassen sich einige einfache Regeln zur Stabilisierung einer Rakete ableiten. Man kann entweder den Schwerpunkt durch Verlängerung der Rakete oder hinzufügen von Gewicht in der Spitze nach oben verschieben oder den Druckpunkt durch Vergrößerung der Flossen nach unten.

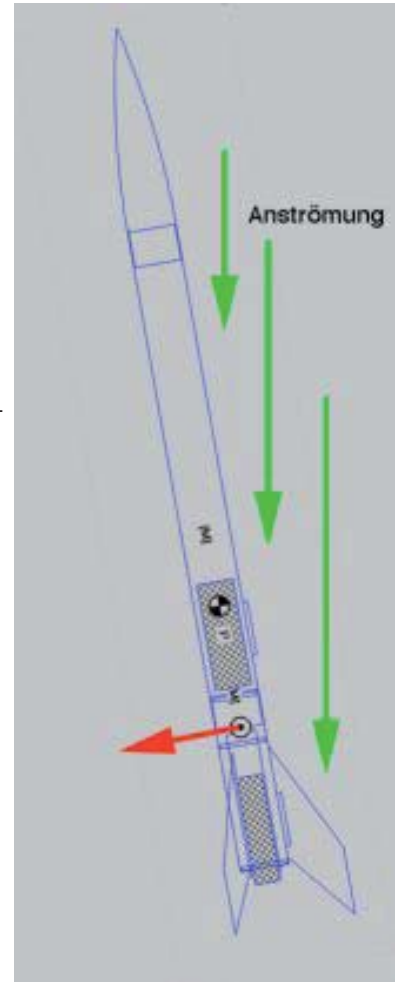


Abbildung 2.7: Prinzipdarstellung Stabilität

Dieses Prinzip der Stabilisierung funktioniert allerdings nur für kleinere Modellraketen. Um größere Trägerraketen zu stabilisieren werden Steuerungssysteme benötigt, die durch eine schwenkbare Düse oder ähnliche Mechanismen die Flugbahn aktiv beeinflussen können.

## 3 Bau und Erprobung einer Wasserrakete

### 3.1 Konstruktion der Rakete

Gegenstand dieses Kapitels soll der Bau der Rakete sein. Dabei sollen sowohl die verwendeten Materialien, als auch die wichtigsten Konstruktionsschritte dokumentiert werden.

#### 3.1.1 Prinzipielle Umsetzung

Das Prinzip der Wasserrakete kann man technisch am einfachsten mit Hilfe eines Gardena-Systems umsetzen. Als Düse für den Druckkörper dient ein Gardena-Hahnstück. Dieses wird in eine an einem Schlauch befestigte Gardena-Kupplung gesteckt. Am anderen Ende des Schlauches wurde ein Autoventil in den Schlauch geschoben und mit Hilfe einer Schlauchschelle fixiert. Nachdem der Druckkörper mit Wasser befüllt wurde, kann nun mit einer Luftpumpe der Druck aufgebaut werden. Die Zündung der Rakete geschieht durch einfaches Öffnen der Gardena-Kupplung.

#### 3.1.2 Bau der Startrampe

##### Materialien:

- 2x Massivholzplatte 200x200x20mm
- 4x Vierkantholz 200x45x45mm
- 3x hölzerner Rundstab, l=100mm, d=10mm
- Gartenschlauch
- Gardena-Kupplung
- Autoventil

- Schraubhaken
- Schnur + Kabelbinder
- Universallack
- Aluminiumrohr
- Dichtband

Zunächst wurde im Mittelpunkt einer Massivholzplatte ein Loch mit dem Durchmesser des Schlauches gebohrt. Daneben benötigt man zwei kleinere Löcher, durch die später die Schnur für den Auslösemechanismus gefädelt wird. Auf beiden Platten müssen nun drei auf einem Kreis liegende Löcher in einem Abstand von  $120^\circ$  zueinander gebohrt werden. Der Durchmesser des Kreises sollte ungefähr dem des Druckkörpers entsprechen. Der Durchmesser der Löcher beträgt 10mm, denn sie sind für die hölzernen Rundstäbe vorgesehen. Sie werden später in die Löcher gesteckt und dienen der Rakete als Leitwerk für die Zeit direkt nach dem Start. Die Massivholzplatten und die Vierkanthölzer werden nun zu einem offenen Kasten verleimt, der zusätzlich mit Nägeln verstärkt wird.

Der Abschussmechanismus entsteht, indem man den Schlauch durch das dafür gebohrte Loch steckt und die Gardena-Kupplung an diesem befestigt. Zusätzlich wird ein kurzes Aluminiumrohr mit Dichtband umwickelt und in die Gardena-Kupplung gesteckt. Diese „Launchtube“ genannte Konstruktion bewirkt, dass das Wasser einer befüllten Rakete nicht in den Schlauch fließt. Außerdem hilft sie auch die Energie der komprimierten Luft besser zu nutzen, da so beim Start, der ineffizientesten Flugphase einer Wasserrakete, weniger Wasser verloren geht. An der anderen Seite des Schlauches wird mit viel Kraft ein vorher zurechtgeschnittenes Autoventil in den Schlauch geschoben. Hierbei hilft es, den Schlauch kurzzeitig in heißes Wasser zu tauchen, wodurch er sich etwas dehnt. Ist dies geschafft, wird das Ventil mit einer Schlauchschelle befestigt.

Um sich nicht der Gefahr auszusetzen, die aus der unmittelbaren Nähe zu einem unter Druck stehenden Körper resultiert, wird der Abschussmechanismus so konstruiert, dass man ihn aus sicherer Entfernung betätigen kann. Dazu wird eine Schnur durch die beiden vorher gebohrten kleinen Löcher gefädelt. Die Enden an der Oberseite der Holzplatte werden mit Hilfe eines straff um die Gardena-Kupplung gezogenen Kabelbinders an diesen angeknötet, im Inneren der Startrampe werden sie zu einer Schlaufe verknotet. An der Schlaufe wird eine dickere Schnur festgeknotet, die dann über einen Schraubhaken in eine sichere Entfernung geführt wird. Durch Zug an dieser Schnur kann die Gardena-

Kupplung ausgelöst werden. Zu beachten ist, dass die Startrampe alleine zu leicht ist und man sie deshalb eher zu sich hinzieht, als dass man die Kupplung auslöst. Aus diesem Grund sollte man die Startrampe immer mit Steinen beschweren!

Zuletzt wurde die Startrampe noch mit rotem Universallack lackiert.

### 3.1.3 Bau des Raketenkörpers

#### Materialien:

- 2x 1,5 Liter PET-Flasche
- Gardena Hahnstück
- PU-Kleber, Epoxy-Harz-Kleber, Pattex Montage Kraft Kleber Spezial
- 3x Flossen aus 4mm dickem Sperrholz
- 6 Schrauben
- Universallack
- Tennisball

Der Raketenkörper setzt sich zusammen aus Druckkörper, Spitze, Flossen und Düse.

**Der Druckkörper** besteht im Wesentlichen aus einer 1,5 Liter PET-Flasche. Der Grund dafür liegt darin, dass Polyethylen-Terephthalat ein besonders druckresistenter Kunststoff ist. Weitere Vorteile sind vor allem die Stoß- und Splitterfestigkeit, wodurch die Stabilität erhöht und das Gefahrenpotential gesenkt wird. Trotzdem sollte jeder Druckkörper, bevor er zum Einsatz kommt, einem Drucktest unterzogen werden. Dazu wird der Tank fast vollständig mit Wasser gefüllt und dann auf einen Druck aufgepumpt, der mindestens ein bar über dem maximalem Startdruck liegt. Im vorliegenden Fall wurde die Flasche bis zu einem Druck von 8 bar getestet, d.h. der maximale Startdruck sollte bei 7 bar liegen. Der Grund, warum man die Flasche beim Drucktest fast vollständig mit Wasser füllt, ist, dass Luft bei einer eventuellen Explosion des Tanks aufgrund seiner schlagartigen Ausdehnung eine extrem laute Schockwelle erzeugt. Auch können Gegenstände oder Personen der Umgebung beschädigt oder verletzt werden, da Luft im Gegensatz zum inkom-

pressiblen Wasser sehr viel mehr Energie speichern kann. Diese Energie könnte abgesprengte Teile beschleunigen und sie so zu gefährlichen Geschossen machen.

**Für die Spitze** wurde der Kopf einer weiteren 1,5 Liter PET-Flasche abgeschnitten. Um einen geraden Schnitt zu gewährleisten, musste zunächst ein Adapter aus einem Flaschendeckel und einer längeren Schraube gebastelt werden. Indem man ein Loch in den Flaschendeckel bohrt, kann man die lange Schraube durchstecken und mit Muttern und Unterlegscheiben fixieren. Indem man nun die Schraube in eine Bohrmaschine einspannt und die Flasche in den Flaschendeckel dreht, kann man die Flasche in Rotation versetzen. Drückt man sie während der Rotation in eine Ecke, kann man ein Messer ansetzen und bekommt einen sehr geraden Schnitt.

Diese Technik wurde auch zur Produktion zweier weiterer Verbindungsstücke benutzt. Das erste Verbindungsstück wird mit Hilfe speziellen PU-Klebers, der besonders gut auf PET haftet, auf den Boden des Druckkörpers befestigt. Aus dem zweiten Verbindungsstück wird ein schmaler Streifen mit Hilfe eines Teppichmessers ausgeschnitten, so dass das verbleibende Stück exakt in das erste Verbindungsstück hineinpasst. Klebt man nun kleine Holzplättchen in das zweite Verbindungsstück, kann man mit Hilfe von Schrauben den Druckkörper mit der Spitze verbinden. Voraussetzung dafür ist, dass die Löcher durch das PET mit Hilfe von z.B. einem Dremel vorgebohrt werden. Der Vorteil dieser Konstruktion ist, dass bei eventuellen Beschädigungen die Spitze austauschbar ist und außerdem, wenn gewünscht, weitere Module, wie z.B. ein Fallschirmmodul, nachträglich eingefügt werden können.

**Die Flossen** bestehen aus 4 mm Sperrholz. Aus Karton wurde eine Schablone gefertigt, die sehr gut an den Druckkörper angelegt werden kann. Damit wurden drei Flossen ausgeschnitten, die dann mit Pattex Montage Kraft Kleber Spezial direkt an den Drucktank geklebt wurden.

**Die Düse** entsteht, indem man einen Flaschendeckel mit Epoxy-Harz-Kleber in ein Gardena-Hahnstück klebt. Nach Aushärten des Klebers wird dann ein Loch mit derselben Fläche wie die der Öffnung des Gardena-Hahnstücks in den Flaschendeckel gebohrt. Diese Konstruktion ist gleichzeitig das Verbindungsstück zwischen

dem Auslösemechanismus mit Gardena-Kupplung und dem Drucktank aus einer PET-Flasche.

Zuletzt wurde der gesamte Raketenkörper mit rotem Universallack lackiert.

### 3.1.4 Bergungssystem

Um Beschädigungen sowohl an der Rakete als auch an Gegenständen der Umgebung und der Verletzung von Personen vorzubeugen, ist es sinnvoll, ein Bergungssystem zu konstruieren. Der klassische Ansatz wäre ein Fallschirm. Bei sehr leichten Wasserraketen wie im vorliegenden Fall reicht es allerdings aus, einen Tennisball an der Spitze zu montieren, der durch Dämpfung des Aufpralls einen kontrollierten und schadlosen Absturz ermöglicht. Bei diesem Modell wurde er mit Hilfe von Epoxy-Harz-Kleber in die Spitze der Rakete geklebt. Dabei wurde auf eine runde Form geachtet, um den Luftwiderstand zu minimieren.

### 3.1.5 Fertige Rakete



Abbildung 3.1: Fertiggestellte Rakete

## 3.2 Erprobung der Rakete

In diesem Kapitel soll die Rakete getestet werden. Es stellt gleichzeitig auch eine Anleitung zur Handhabung dar.

### 3.2.1 Startvorbereitungen

Für den Start der Rakete wird zunächst eine Luftpumpe mit Manometer benötigt. Außerdem stellt die Auswahl eines Startgeländes oft ein Problem dar, denn es sollten dort weder Bäume stehen, noch Hochspannungsleitungen. Eine Rakete sollte nie in einem Gebiet mit vielen Leuten gezündet werden, da das Verletzungsrisiko hoch ist. Des Weiteren ist ein weicher Boden vorteilhaft, um Beschädigungen an der Rakete zu vermeiden. Spontane Windstöße können die Rakete recht weit abtreiben, deswegen muss immer genug Spielraum bei der Größe des Startgeländes eingerechnet werden. Hat man ein Startgelände gefunden, so muss man Startrampe, Luftpumpe, Rakete und zusätzlich Wasser als Treibstoff dorthintragen. Vor Ort befüllt man zunächst die Rakete und steckt sie dann auf die Startrampe, indem man diese kippt. So fließt kein Wasser aus. Dann wird die relativ leichte Startrampe mit Steinen beschwert, um sie beim Auslösen nicht wegzuziehen. Zum Schluss sollte man noch einmal sicherstellen, dass die Startrampe wirklich gerade ausgerichtet ist und festen Stand hat. Dann führt man die Auslöseschnur über den Schraubhaken und fängt aus sicherer Entfernung an zu Pumpen. Einer unter Druck stehenden Rakete darf man sich auf keinen Fall jemand nähern, da aus einer Explosion eine extrem laute Schockwelle resultiert. Auch besteht die Gefahr durch wegfliegende Teile getroffen zu werden. Sollte es einmal nötig sein den Druck aus der Flasche entweichen zu lassen, macht man das am besten durch Eindrücken des Stifts beim Autoventil. Ist alles in Ordnung, kann man durch ziehen an der Auslöseleine den Antrieb aktivieren.

### 3.2.2 Flug

Nach dem Start stößt die Rakete ihren Treibstoff sehr schnell aus, wie es für Wasserraketen üblich ist. Bei optimalem Verhältnis von Wasser zu Luft, das ungefähr bei einer Füllmenge von 0,6 Litern liegt, d.h. einem Drittel des Volumens, kann die 320 Gramm schwere Rakete mit ihrem maximalen Startdruck von 7 bar bis zu 30 Meter und mehr in die Luft steigen.



## 4 Ausblick

Der Raketenmodellbau ist ein äußerst spannendes Hobby. In manchen Ländern gibt es sogar Vereine, die Wettkämpfe veranstalten. Andere Begeisterte gehen auf Rekordjagd, so liegt der Höhenrekord einer einstufigen Wasserrakete bei ungefähr 630 Metern. Jedoch, Raketen betreffen uns noch viel direkter.

Obwohl wir es nicht realisieren, ist die Raketentechnik doch eine Voraussetzung für Dinge, die wir alltäglich benutzen. Dies gilt vor allem für Satelliten, die eine Rakete benötigen, um in die Umlaufbahn zu gelangen. Im täglichen Leben nutzen wir oft unbewusst die Vorteile von Kommunikationssatelliten oder Erdbeobachtungssatelliten, z.B. wenn wir den Wetterbericht hören oder das Kartenangebot von Google Maps benutzen.

Des Weiteren könnte es schon in wenigen Jahren dazu kommen, dass eine Ares-I-Trägerrakete das Orion-Raumschiff, den Nachfolger des Space Shuttle, auf die erste bemannte Mission zum Mars befördert, was ein weiterer Fortschritt von größter Bedeutung für die Menschheit wäre.

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Modellvorstellung zum Raketenantrieb . . . . .	5
2.2	$N$ - $\vec{v}_B$ -Diagramm . . . . .	6
2.3	Impulserhaltung beim Raketenprinzip . . . . .	7
2.4	Prinzipdarstellung Feststoffrakete . . . . .	14
2.5	Prinzipdarstellung Flüssigkeitsrakete . . . . .	15
2.6	Prinzipdarstellung Wasserrakete . . . . .	16
2.7	Prinzipdarstellung Stabilität . . . . .	17
3.1	Fertiggestellte Rakete . . . . .	23

## Literaturverzeichnis

- 1 BECKER, Andreas: Bau einer Gardena - Duese. 2006. – Bastelanleitung
- 2 BECKER, Andreas: Bau einer Wasserrakete mit Bergungssystem. 2006. – Bastelanleitung
- 3 MAN, John: *Eroberung des Weltalls*. Reader´s Digest, 2000 (Unser 20. Jahrhundert)
- 4 STEIN, Michael: <http://www.raumfahrer.net/raumfahrt/raketen/funktion.shtml>, Abruf: 29.01.2009. Website
- 5 UNBEKANNT: Baubericht einer Startrampe. – Power Point Präsentation
- 6 UNI-MÜNCHEN: [http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web\\_ph11/umwelt-technik/05rakete/index.htm](http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph11/umwelt-technik/05rakete/index.htm), Abruf: 29.01.2009. Website
- 7 VERLAG, Springer: *Vom Feuerpfeil zum Space Shuttle*. CD-ROM,
- 8 WIRTH, Andi ; MUELLER, Andreas: Die Physikhinter den Modellraketen / ARGOS. 2004. – Forschungsbericht

# Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

---

Unterschleißheim, 29.10.2009