

Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Fakultät für Physik und Astronomie

Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik

Raketen in der Schule

Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsexamensprüfung
für ein Lehramt an Realschulen

Eingereicht von

Analena Kamprad

im September 2009

Betreuer: AR Dr. Thomas Wilhelm

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Grundsätzliche Überlegungen	6
2.1	Begründung des Einsatzes von Raketenversuchen	6
2.2	Lehrplaneinordnung	8
2.2.1	Grundschule	9
2.2.2	Hauptschule	9
2.2.3	Realschule	10
2.2.4	Gymnasium	13
2.3	Rechtliche Einschränkungen bei Raketenstarts	16
3	Theorie der Raketenphysik	18
3.1	Das dritte Newtonsche Gesetz und das Rückstoßprinzip	18
3.2	Raketengleichung nach ZIOLKOWSKI	19
4	Ausgewählte Experimente mit Raketenmodellen in der Literatur	23
4.1	Experimente mit dem Kugelraketenwagen	23
4.1.1	Abhängigkeit des Endgeschwindigkeitsbetrages v_e vom Austrittsgeschwindigkeitsbetrag c	23
4.1.2	Abhängigkeit des Endgeschwindigkeitsbetrages v_e von der Anzahl der Kugeln	24
4.2	Experimentelle Herleitung der Raketengleichung mit einem Wasserraketenwagen	24
4.3	Bestimmung der Schubkraft einer Rakete	27
4.4	Messen und Modellieren des Fluges einer Wasserrakete	28
4.5	Abschätzungen zur Wasserrakete	29
5	Raketenmodelle	31
5.1	Streichholzrakete	31
5.2	Filmdöschenrakete	34
5.3	Luftballonrakete	36
5.4	Luft- bzw. Wasserrakete	41

5.5	CO ₂ -Rakete.....	46
5.6	Raketenschiffchen mit Ethanol.....	49
5.7	Ethanol-Rakete	52
5.8	Modellrakete mit Treibsatz.....	54
6	Raketenstation am Girls' Day.....	64
6.1	Organisatorisches	64
6.2	Reaktionen zu den Raketenmodellen	65
6.2.1	Luftballonrakete	65
6.2.2	Streichholzrakete.....	65
6.2.3	Filmdöschenrakete	66
6.2.4	Wasserrakete	67
7	Raketenbasteln mit Grundschulkindern	69
7.1	Organisatorisches	69
7.2	Das Wasserraketenbasteln und –starten	69
8	Zusammenfassung.....	74
9	Literaturverzeichnis.....	76
10	Anhang	79
10.1	IMR Sicherheitskodex	79
10.2	Startplatzabmessungen	81
10.3	Bastelanleitung für die Wasserrakete	82
10.4	Bastelanleitung für den Luftballonraketenwagen.....	83
10.5	Evaluationszettel.....	84
10.6	Fotos der Grundschulklasse beim Wasserraketenbauen und –starten.....	87
10.7	Dankeskarte der Grundschul Kinder	92
11	Danksagung	93
12	Selbstständigkeitserklärung.....	94

1 Einleitung

Vor genau 40 Jahren betrat der Mensch das erste Mal den Mond. Damals verfolgten Millionen von Menschen dieses historische Ereignis vor ihren Fernsehgeräten und wurden Zeugen eines spannenden Raumfluges. Die Faszination der Raumfahrt wurde seitdem immer wieder durch weitere denkwürdige Raketenstarts neu entfacht. Zum Beispiel der Start des Space-Shuttle, das an einer Trägerrakete verbunden im April 1981 zum ersten Mal ins Weltall flog und die erste wieder verwendbare Raumfähre darstellte. Oder man denke nur an die zahlreichen spannenden Apollomissionen, von denen der nervenaufreibende Flug der Apollo 13 sogar verfilmt wurde.

Schon immer hat Astronautik und somit auch Raketen die Menschen besonders angesprochen. Natürlich sind davon auch Schüler und Schülerinnen nicht ausgenommen, die z.B. bei den Abenteuern der Crew des Raumschiffes Enterprise mitfiebern oder die spannenden Raumschlachten in den StarWars-Filmen gebannt verfolgen.

In dieser Staatsexamensarbeit wird das Thema „Raketen in der Schule“ genauer betrachtet. Es soll als Anregung für Lehrer und Lehrerinnen oder Studierende des Lehramtes dienen, die daran interessiert sind, die spannenden Raketenmodelle, die im Kapitel 5 vorgestellt und kommentiert werden, im Schulalltag einzubauen. Dank dem Interesse der Kinder an der Raumfahrt hat man die Möglichkeit, selbst scheinbar trockene Themen aus dem Gebiet der Mechanik abwechslungsreicher zu gestalten und mit vielen Knalleffekten zu beleben.

Dazu wird im Kapitel 2 zunächst der Lehrplan der Grund-, Haupt-, Realschule und des Gymnasiums analysiert und es werden Themengebiete aus diesem vorgestellt, in denen Raketenmodelle besonders passend Verwendung finden. Anschließend werden rechtliche Einschränkungen besprochen, die es bei Starts von Modellraketen unbedingt einzuhalten gilt, damit niemand in Gefahr gerät.

Das Kapitel 3 behandelt die Physik des Raketenfluges. Es wird im Detail auf das dritte Newtonsche Axiom eingegangen, das den Antrieb einer Rakete erklärt. Außerdem findet man in diesem Kapitel die Herleitung der Raketengleichung nach ZIOLKOWSKI, die einem verdeutlicht welche Eigenschaften einer Rakete für ihre Maximalgeschwindigkeit oder ihre Schubkraft verantwortlich sind.

Im Kapitel 4 werden einige ausgewählte Experimente zur Raketenphysik vorgestellt, wie sie in der Literatur zu finden sind. Es wird zunächst die experimentelle Erforschung der Raketengleichung nach WEISS und anschließend die Untersuchung der Schubkraft anhand von Versuchen mit einem

Wasserraketenwagen beschrieben. Es wird zudem kurz behandelt, wie man einen Raketenflug geschickt messen und modellieren kann, wobei hier bloß beispielhaft auf die Durchführung der dazu notwendigen Experimente eingegangen wird. Da bei diesen Versuchen Wasserraketen Verwendung finden, werden zu diesem Modell wichtige Abschätzungen genannt, die die jungen „Raketenforscher“ für Berechnungen des Raketenfluges kennen sollten.

Die verschiedenen Raketenmodelle sowie ihre Anleitungen und Bewertungen sind in Kapitel 5 erklärt. Es wird die Anfertigung, der Start und die Funktionsweise von acht ausgewählten Modellen beschrieben und dazu wichtige Anmerkungen auf mögliche Schwierigkeiten oder Besonderheiten gegeben, die beim Bau oder Start der Raketen auffielen. Anschließend wird jedes Modell und ihre Einsatzmöglichkeit in der Schule kommentiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden außerdem an zwei Tagen Schülergruppen an die Universität Würzburg eingeladen, die verschiedene Raketenmodelle ausprobierten. Die Reaktionen der Schülerinnen sowie weitere Impressionen des „Girls’ Days“ der dieses Jahr am 23. April stattfand, werden im Kapitel 6 präsentiert.

Die Klasse 4b der Grundschule Zell besuchte zusammen mit ihrer Klassenlehrerin Frau Vogelsang am 16. Juli die Physikdidaktik der Universität Würzburg und baute Wasserraketen aus PET-Flaschen. Die Begeisterung der Kinder beim Basteln und Starten ihrer Modelle wird im Kapitel 7 beschrieben. Es entstanden außerdem noch viele schöne Fotos der Schüler und Schülerinnen an diesem aufregenden Tag. Diese sind im Anhang zu finden.

2 Grundsätzliche Überlegungen

Das Kapitel 2 beschäftigt sich mit der Frage, warum der Einsatz von Raketenversuchen in der Schule sinnvoll ist und wird dazu passende Passagen aus dem Lehrplan als Begründung vorlegen. Außerdem werden wichtige Experimente aus der Raketenphysik vorgestellt und es wird auf rechtliche Einschränkungen beim Raketenstart eingegangen.

2.1 Begründung des Einsatzes von Raketenversuchen

Im Physikunterricht der Sekundarstufe I oder im Sachkundeunterricht der Grundschule sollten spannende und anschauliche Experimente grundsätzlich nie fehlen, denn sie verleihen der oftmals trockenen Theorie der Physik eine interesseweckende Komponente. In den Köpfen vieler ist leider immer noch das Bild eines typischen Physikunterrichts verankert, der nur aus Mathematik und komplizierten Gleichungen besteht, die der Schüler oder die Schülerin immer wieder umformen soll, um der Lehrkraft das erwünschte Ergebnis zu liefern.

Diese Vorstellung gilt es durch eine Neue zu ersetzen, in der der Physik- oder Sachkundeunterricht aus Eigeninitiative der Schüler und Schülerinnen und lebendiger Abwechslung zwischen reizvollen Versuchen und Behandlung schülernaher Themen aus den Bereichen der Naturwissenschaften besteht. So fordert es auch der Lehrplan. Hier ein Auszug aus dem aktuellen Lehrplan der bayerischen Realschulen:

„Von Anfang an spielt das Experiment eine zentrale Rolle, nicht nur als Demonstrationsversuch durch den Lehrer, sondern ganz besonders auch als Schülerexperiment. Dadurch werden nicht nur kreatives Denken und Handeln, sondern auch Teamgeist, Hilfsbereitschaft und positive Diskussionskultur gefördert. Die eigentätige Planung, Durchführung, Beschreibung und Auswertung von Schülerversuchen fordern von den Schülern die Bereitschaft zu disziplinierter und sachlicher Zusammenarbeit in Gruppen und stets sicherheitsbewusstes Verhalten. Schülerversuche fördern darüber hinaus das handwerkliche Geschick und wecken Interesse und Freude an naturwissenschaftlich-technischen Problemstellungen. Beim Beschreiben von Beobachtungen, Auswerten von Experimenten und Formulieren von Ergebnissen werden die Schüler sowohl mit der physikalischen Fachsprache vertraut als auch zu einem treffenden Gebrauch der deutschen Sprache angeleitet.“¹

Diesem Anspruch wird man als Lehrer oder Lehrerin gerecht, indem man zu jedem Unterrichtsthema möglichst viele sinnvolle Experimente in das Unterrichtsgeschehen einfließen lässt. Natürlich sollte es sich hierbei auch um Schülerexperimente handeln, denn auch damit kann man den Schülern und Schülerinnen die Physik persönlich näher bringen.

¹ Lehrplan für die bayerische Realschule 2009, S.61

Alle in dieser Arbeit vorgestellten Raketenversuche können sowohl als Demonstrationsversuch als auch als Schülerexperiment durchgeführt werden. Es wird zwar manchmal mit explosiven oder brennbaren Materialien gearbeitet, dennoch besteht für die jungen Forscher keine Gefahr, wenn sie verantwortungsbewusst und nicht leichtsinnig mit den Raketen umgehen.

Es ist darauf zu achten, dass nicht alle Raketenmodelle, die für Schüler und Schülerinnen der Sekundarstufe I geeignet sind, auch für Grundschulkinder angebracht sind. Jeder Lehrer und jede Lehrerin muss sich bewusst sein, ab wann ein Versuch zu gefährlich für die entsprechende Altersklasse wird. Die Vorbildfunktion liegt darin, vor allem mit leicht entzündlichen Stoffen nur mit großer Vorsicht zu hantieren und gleichzeitig zu zeigen, dass man keine Angst davor haben muss. In der Grundschule sollen die Kinder den richtigen Umgang mit Feuer und die damit verbundenen Gefahren kennenlernen. Dazu ist es notwendig, dass sie die Möglichkeit bekommen, eigene Erfahrungen zu sammeln. Selbstverständlich muss immer darauf hingewiesen werden, dass die Raketenversuche nur im Beisein eines Erwachsenen aufgebaut und gestartet werden dürfen.

Nun zu der Frage, weshalb man Raketenmodelle in der Schule einsetzen sollte. In erster Linie kann man Raketenversuche mit den Schülern und Schülerinnen durchführen, um das Rückstoßprinzip zu veranschaulichen. Raketen haben den großen Vorteil, dass sie immer begeistern. Sie werden oft mit hohen Geschwindigkeiten und Explosionen in Verbindung gebracht und natürlich macht es jedem Kind, wie auch Erwachsenen Spaß, etwas in die Luft zu schießen. Diese Faszination sollte man als Lehrer oder Lehrerin unbedingt nutzen! Aha- und Knalleffekte beleben jeden Physikunterricht. Die meisten Modelle, die im fünften Kapitel vorgestellt werden, sind schnell und einfach zu bauen und der Zeitaufwand ist nicht höher, wenn nicht sogar niedriger als bei vergleichbaren Experimenten.

Für die Besprechung des Rückstoßprinzips im Schulunterricht wird oft die Luftkissenbahn verwendet. Mit zu hohem Lärmpegel und meiner Meinung nach wenig spektakulären Effekten wirkt sie neben einer Rakete, die mit Zischen in den Himmel schießt, eher langweilig. Warum den Physikunterricht nicht kurzerhand nach draußen verlegen und das Rückstoßprinzip mit beeindruckender Showeinlage demonstrieren?

Auch für quantitative Betrachtungen lassen sich Raketen im Unterricht verwenden. Für die Behandlung der Schubkraft, Messung der Flughöhe sowie der Schubdauer eignen sich vor allem Modelle, die an einer gespannten Schnur befestigt werden. Ob der Faden dabei senkrecht oder waagrecht aufgehängt ist, kommt ganz darauf an, was man untersuchen möchte.

Vertikal gespannt kann mit Bestimmung der Flughöhe die Schubkraft berechnet werden. Horizontal aufgehängt und mit Hilfe von Lichtschranken können Zeiten gemessen werden, die die Geschosse

für bestimmte Flugabschnitte benötigen und weiterverwendet werden, um Geschwindigkeit oder Beschleunigungen zu berechnen.

An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass es sich bei dieser Bewegung nicht um eine kontinuierlich gleichförmige handelt, sondern die Masse der Rakete während der Schubdauer abnimmt. Dieser Umstand muss bei genauer quantitativer Untersuchung entweder in die Berechnung oder in die Fehlerbetrachtung einfließen.

In der Sekundarstufe II kommen im Physikunterricht oft Computersimulationen zum Einsatz. Sie werden explizit im Lehrplan der bayerischen Gymnasien gefordert.

„Die regelmäßige Verwendung geeigneter Software erleichtert ihnen einerseits das Auswerten und Dokumentieren von Experimenten und veranschaulicht ihnen andererseits komplizierte physikalische Sachverhalte.“²

Auch hierzu lassen sich Raketen verwenden. Zum Beispiel kann man ihre Flugbahn mit einer Videokamera aufnehmen und diese anschließend von den Schülern und Schülerinnen am Computer auswerten lassen.

Selbstverständlich ist es jedem Lehrer und jeder Lehrerin selbst überlassen, zu welchen Themen sie die Raketen einsetzen möchten. Vielleicht fallen dem Leser oder der Leserin dieser Arbeit sogar noch unerwähnte Möglichkeiten ein, das spannende Experimentierobjekt Rakete in den Schulalltag einzubauen. Die Einfachheit der Raketenmodelle und somit ihre hervorragende Verwendungsmöglichkeit für die Schule wird jedem schnell bewusst, der sich einmal die Zeit nimmt und selbst ein Modell konstruiert. Letztendlich werden das Strahlen in den Augen der Schüler und Schülerinnen und ihre entzückten Aufschreie, wenn die Raketen abheben, überzeugen. Deshalb heißt mein Appell an diejenigen, die Wert darauf legen den Kindern einen abwechslungsreichen und spannenden Unterricht zu bieten: Ausprobieren, tüfteln und Spaß daran haben!

2.2 Lehrplaneinordnung

Im vorangegangenen Teilkapitel wurde auf die Anwendungsmöglichkeiten der Rakete in der Schule eingegangen. Darin wurden auch schon konkrete Themengebiete des Physikunterrichts kurz vorgestellt, zu welchen nun der Bezug zum Lehrplan genauer analysiert werden soll. Raketen können mit Schülern und Schülerinnen jeden Alters behandelt werden, daher werden im Folgenden die Lehrpläne von Grundschule bis Gymnasium betrachtet.

² Lehrplan für das bayerische Gymnasium 2009, Jgst. 11-12

2.2.1 Grundschule

Im Lehrplan der bayerischen Grundschulen wird bereits in der ersten Klasse Modellbauen im Heimat- und Sachkundeunterricht vorgeschlagen.

„1.3.3 Technisches Spielzeug

[...] Ein Modell bauen, mechanische Funktion anwenden: Wagen, Bagger, Motorschiff, Gummimotorflieger o. Ä. [...]“³

Außerdem lässt der Lehrplan den Lehrern und Lehrerinnen Spielraum, um mit ihren Klassen Projekte zu gestalten, die neben dem regulären Unterricht stattfinden können. Dabei sollte man sich das Interesse der Schüler und Schülerinnen für schnelle Geschosse vor Augen halten. Vor allem im Sommer, können bei schönem Wetter die Modellraketen auf dem Schulhof oder auf Fussballplätzen gestartet werden. Für jedes Kind ist dies eine hervorragende Abwechslung zum normalen Schulalltag, der meist drinnen verbracht werden muss.

In der Grundschule sollten für Kinder gefährliche Raketenmodelle, d.h. Modelle, mit leicht entzündlichem Treibstoff, selbstverständlich nicht durchgenommen oder vorgeführt werden, da diese zum Nachmachen verleiten. Es kann zu schlimmen Verbrennungen kommen, wenn die Raketen ohne erwachsene Aufsicht von den Kindern nachgebaut werden. Zu weiteren gefährlichen Verletzungen kann es führen, falls die Geschosse z.B. auf andere abgefeuert werden. Inwieweit die Grundschüler und –schülerinnen in der Lage sind, mit Streichhölzern und Ähnlichem umzugehen, muss die Lehrerin oder der Lehrer selbst abschätzen. Eigentlich sollte es kein Problem sein, denn trotz allem ist es empfehlenswert, dass die Kinder unter Aufsicht einer erwachsenen Person den richtigen Umgang mit Feuer lernen. Welche Raketenmodelle für die Grundschule am geeignetsten sind, kann man dem Kapitel 5.2 entnehmen, in dem die verschiedenen Modelle vorgestellt und beurteilt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde außerdem mit einer vierten Klasse der Grundschule Zell der Bau von Wasserraketen erprobt. Dabei wurde untersucht, ob die Kinder mit der Konstruktionsanleitung und dem Bau der Wasserraketen zurecht kommen und wie viel sie von der Physik, die hinter dem Antrieb des Modells steckt, verstehen können. Die Ergebnisse und Eindrücke dieses Tages werden im Kapitel 7 vorgestellt.

2.2.2 Hauptschule

In der Hauptschule kann man Raketen zum Thema „Kraft“ verwenden, um speziell auf die Schwerkraft einzugehen. Der Begriff wird in der siebten Jahrgangsstufe im Fach PCB eingeführt.

³ Lehrplan für die bayerische Grundschule 2009, S. 105

Die verwendeten Modelle stellen hierbei vor allem Veranschaulichungsmaterial dar. Die Raketen können ohne großen Zeitaufwand in der entsprechenden Unterrichtsstunde vorgeführt werden, um den Schülern und Schülerinnen ein abwechslungsreiches Experiment zu bieten. An ihnen kann man demonstrieren, dass die Raketen die Anziehungskraft der Erde überwinden müssen, um überhaupt abzuheben. Da hierbei laut Lehrplan weder auf die Schubkraft noch auf das Wechselwirkungsprinzip eingegangen werden soll, ist es fraglich, ob man als Lehrer oder Lehrerin überhaupt den Raketenantrieb erläutern sollte. Die Raketen dienen in diesem Fall in erster Linie dazu, den Unterricht aufzulockern.

Eine weitere Gelegenheit, die Modelle im Unterricht vorzuführen ergibt sich in der neunten Jahrgangsstufe. Im Fach PCB lernen die Schüler und Schülerinnen den Zusammenhang von Kraft und Bewegung kennen.

„Ausgehend von eigenen Erfahrungen erhalten die Schüler Kenntnisse über die Begriffe „Kraft“ und „Geschwindigkeit“ und erkennen, dass das Ausüben einer Kraft zu einer Geschwindigkeitsänderung führt.“⁴

Damit die Raketenmodelle an Geschwindigkeit zunehmen, muss eine Kraft auf sie wirken. Abermals wird hier nicht auf das Wechselwirkungsprinzip und somit auf das Rückstoßprinzip als Anwendung dafür eingegangen. Außerdem werden keine Messungen durchgeführt.

Man kann als Lehrer oder Lehrerin zwischen verschiedenen Fortbewegungsmitteln wählen, um dieses Thema anschaulich zu machen, wobei Raketen höchstwahrscheinlich zu den etwas spannenderen Modellen gehören werden. Zudem kann man prima an Schülervorstellungen anknüpfen, da die meisten Schüler und Schülerinnen Raketen ohnehin schon mit Kraft in Verbindung bringen.

2.2.3 Realschule

In der Realschule eröffnen sich einem wohl die meisten Möglichkeiten diese spannenden Geschehnisse in den Schulalltag einzubauen. Gerade der Physikunterricht soll mit vielen technischen Anwendungen und interessanten Experimenten attraktiv gestaltet werden. Zudem werden im Lehrplan zu jeder Jahrgangsstufe mögliche Projekte vorgeschlagen, in denen sich die Schüler und Schülerinnen selbstständig mit Themen auseinander setzen und oftmals Modelle oder Apparate bauen sollen. In der Realschule wird zwar Theorie ausreichend besprochen, es wird aber stets darauf geachtet, dass die Praxis nicht zu kurz kommt und die Schülern und Schülerinnen somit ihr

⁴ Lehrplan für die bayerische Hauptschule 2009, S. 359

handwerkliches Geschick entwickeln können. Darum passen die Behandlung und das Bauen von Modellraketen sehr gut in das Gesamtkonzept der Realschulen. Außer in der letzten Jahrgangsstufe bietet der Lehrplan in jeder Stufe des Physikunterrichts die Möglichkeit entsprechende Themen mit Hilfe von Raketen zu erklären oder zu veranschaulichen.

In der siebten Jahrgangsstufe beschäftigen sich die Kinder im Zusammenhang mit dem Thema „Kraft“ unter anderem mit dem Begriff der Gravitation und dem Wechselwirkungsprinzip.

„[...] Gravitation; Schwere; Gewichtskraft als Folge der Gravitation zwischen Erde/Himmelskörper und Körper; [...] Wechselwirkungsprinzip (Wechselwirkungskräfte, die an zwei verschiedenen Körpern angreifen); Beispiele für Wechselwirkungskräfte [...]“⁵

Falls man in seinem Unterricht die Gravitation mit dem interessanten Gebiet der Raumfahrt verknüpft, sollte die Behandlung von Raumfahren nicht fehlen. Die Schüler kennen aus ihren Alltagserfahrungen beispielsweise die spannenden Abenteuer des Raumschiffs Enterprise oder die Star Wars – Filme, die das Interesse für die Raumfahrt bei ihnen bereits geweckt haben. Es gilt als Lehrkraft daran anzuknüpfen und die Schüler und Schülerinnen z.B. mit dem Bau eines Raketenmodells für das Thema Raumfahrt zu begeistern, vor allem mit dem Ausblick darauf, dass in der achten Jahrgangsstufe dieses tiefer gehend besprochen wird. Auf diese Weise schafft man Grundlagen und einen roten Faden, der sich bis zur zehnten Jahrgangsstufe immer wieder aufgreifen lässt.

Um den Antrieb einer Rakete zu verstehen, bedarf es der Kenntnis des Wechselwirkungsprinzips, welches im Kapitel 3.1 näher behandelt wird. Eine Rakete macht sich dieses physikalische Gesetz zu Nutzen, denn nichts anderes passiert, wenn sie abhebt. Die Rakete wird mit demselben Kraftbetrag nach oben geschossen, mit dem der Treibstoff nach hinten ausgestoßen wird. Sehr schön zu erkennen ist es bei der Wasserrakete (siehe Kapitel 5.4). Das Wasser schießt in einem Strahl aus der Flasche heraus und katapultiert diese nach oben. Daher ist dieses Modell für die Veranschaulichung des Wechselwirkungsprinzips unabdingbar.

In 8I sowie in 8II bietet sich dem Lehrer oder der Lehrerin eine Vielzahl von Möglichkeiten Raketenmodelle in das Unterrichtsgeschehen einfließen zu lassen. Zur Behandlung des Themas „Bewegung“ werden als Experimentierobjekte oft die wenig spektakulären Wägen auf der Schienenbahn verwendet. Stattdessen kann man hier eine CO₂-Rakete oder Luftballonrakete (siehe Kapitel 5.5 und 5.3) an einer gespannten Schnur über die Köpfe der Schüler und Schülerinnen hinweg durch das Klassenzimmer sausen lassen. Das Staunen der Kinder wird groß sein.

⁵ Lehrplan für die bayerische Realschule 2009, S. 238

Hierbei ist jedoch, wie bereits erwähnt, zu beachten, dass es sich bei einem Raketenflug nicht um die im Lehrplan geforderte gleichförmige und gleichmäßig beschleunigte Bewegung handelt.

„An Abläufen aus der Umwelt erarbeiten die Schüler die gleichförmige und gleichmäßig beschleunigte Bewegung.“⁶

Daher sollte die genaue Analyse des Raketenfluges wenn möglich erst in den höheren Jahrgangsstufen behandelt werden oder ganz auf die Demonstration des Raketenfluges zum Thema kontinuierliche Bewegung verzichtet werden. Es eignet sich bestenfalls als Einstiegsexperiment, dass die Aufmerksamkeit der Schüler und Schülerinnen erregt.

Dass man Raketen auch im Themengebiet „Druck“ durchaus vorführen kann, beweist die Funktionsweise der Wasser- bzw. Lufrakete (siehe Kapitel 5.4). Man pumpt jeweils Luft in den Flaschenkörper, so dass sich ein Druck darin aufbaut. Zum Starten lässt man die Luft entweichen und die Rakete hebt ab. Auch hier braucht man nicht explizit darauf eingehen, wie das Geschoss nun konkret zu seiner Schubkraft gelangt. Viel mehr nutzt es dem Lehrer oder der Lehrerin als Beispiel einer Anwendung des Drucks.

Wie bereits genannt, spielt die Raumfahrt im Rahmen des Astronomiebereiches eine große Rolle. Die Schüler und Schülerinnen werden sich in diesem Abschnitt unter anderem mit unserem Sonnensystem beschäftigen und werden außerdem eine Menge über die Geschichte der Raumfahrt erfahren.

„Unser Sonnensystem (ca. 5 Std.)
[...]; künstliche Satelliten, Raumflug“⁷

Zu diesem Bereich eignet sich hervorragend der Bau einer Modellrakete mit Treibsatz (siehe z.B. Kapitel 5.8) als Schülerprojekt. Astronomie wird in der Regel gegen Ende des Schuljahres behandelt, wobei dies eine zeitliche Flexibilität heißen kann. Die Lehrkraft entscheidet, welche Themengebiete tiefer gehend behandelt werden und ob es noch Raum für mögliche Projekte gibt. Selbst wenn es zeitlich knapp wird, den Lehrplan einzuhalten, gibt es jedoch die Gelegenheit, das Projekt als eine Art Hausaufgabe aufzugeben. Das heißt, die Schüler und Schülerinnen werden sich in ihrer Freizeit mit der Konstruktion einer Rakete beschäftigen. Dies wird aber wahrscheinlich nur dann von Erfolg gekrönt sein, wenn es sich um engagierte und interessierte Lernende handelt. Daher ist die Überlegung, ob man solch ein Projekt durchführen möchte, stark von der Schülermotivation abhängig.

⁶ Lehrplan für die bayerische Realschule 2009, S. 322

⁷ Lehrplan für die bayerische Realschule 2009, S. 324

Im Vergleich zur achten Jahrgangsstufe findet sich in der neunten nur schwer ein geeignetes Physikgebiet für Raketen. Einzig allein zum Thema „Temperatur, Druck und Volumen als Zustandsgrößen eines eingeschlossenen Gases“ könnte man eine Ethanol-Rakete (siehe Kapitel 5.7) starten lassen und somit die schlagartige Druckänderung, wenn das Ethanolgas entzündet wird, demonstrieren. Dieser Effekt bewirkt, dass eine kleine Plastikflasche in die Luft geschleudert wird und ist ein recht spektakuläres Experiment.

Wie schon bemerkt, bleibt die Suche nach einem passenden Einsatz von Raketen in der zehnten Jahrgangsstufe erfolglos. Die zu behandelten Themen „Elektrizitätslehre“ und „Atom- und Kernphysik“ bieten offensichtlich keine Möglichkeit, Raketen im Physikunterricht der zehnten Klasse sinnvoll einzusetzen.

2.2.4 Gymnasium

In der fünften Jahrgangsstufe wird in bayerischen Gymnasien das Fach „Natur und Technik- Schwerpunkt: Naturwissenschaftliches Arbeiten“ als Vorbereitung auf die Fächer Chemie, Biologie und Physik unterrichtet. Der Physikunterricht beginnt in der siebten Jahrgangsstufe unter dem Namen „Natur und Technik - Schwerpunkt: Physik“ und wird ab der achten Jahrgangsstufe unter dem Namen „Physik“ weitergeführt.

Dem Lehrplan der fünften Klasse zum Unterrichtsfach „Natur und Technik - Schwerpunkt: Naturwissenschaftliches Arbeiten“ kann folgendes betreffend der Förderung der Kreativität und handwerkliches Geschick der Kinder entnommen werden:

„Die Begeisterung für praktisches Arbeiten sowie der hohe Grad an Eigenaktivität regen die Phantasie der Mädchen und Jungen an und fördern ihre Kreativität. Sie werden ermutigt, eigene Ideen für technische Lösungsansätze einzubringen und auch handwerklich umzusetzen, wobei sie mit grundlegenden Sicherheitsregeln vertraut werden. Die gewonnenen Erkenntnisse stärken das Bewusstsein der Schüler für die Notwendigkeit umweltgerechten Handelns und zeigen ihnen entsprechende Möglichkeiten auf. [...]

NT 5.1.1 Arbeitsmethoden

[...] Beim handwerklichen Gestalten technischer Lösungsansätze setzen sie verschiedene Materialien kreativ und zweckentsprechend ein. Die Arbeit im Team lässt sie die Vorteile einer Arbeitsteilung erleben, zeigt aber auch die Notwendigkeit, Verhaltensregeln zu formulieren und einzuhalten. [...]

Bauen und Erfinden: z. B. mit Werkzeugen und Geräten umgehen, konstruieren und testen [...]⁸

⁸ Lehrplan für das bayerische Gymnasium 2009, Jgst. 5 „Natur und Technik“

Diese Ansprüche werden z.B. vom selbstständigen Bau der Schüler und Schülerinnen eines Raketenmodells erfüllt. Außerdem soll in der fünften Jahrgangsstufe das Thema „Flug“ behandelt werden und hierbei auf das Fliegen und verschiedene Flugtechniken eingegangen werden.

„Luft

[...] weitere Erfahrungen und Anwendungen zur Auswahl: Gerüche, Fliegen, Luftdruck, Wetter, Feuer, Flugtechnik, [...]“⁹

Wenn verschiedene Flugobjekte im Unterricht vom Lehrer oder der Lehrerin gezeigt werden, darf die Rakete nicht fehlen. Falls es Interessierte in der Klasse gibt, die sich näher mit dem Antrieb von Raketen oder Düsenflugzeugen beschäftigen wollen, könnte man Referate oder kleine Projekte verteilen, die z.B. die verschiedenen Strahltriebwerke vorstellen. Es ist aber anzumerken, dass es sich hierbei um komplexe Maschinen handelt und es für manche Schüler und Schülerinnen der fünften Klasse noch zu schwierig sein könnte, alles zu verstehen. Ansonsten kann man zu diesem Themengebiet so viele Raketenmodelle wie gewünscht vorstellen oder den Kindern auftragen, zu Hause selbst ein paar davon auszuprobieren, die sie dann im Unterricht präsentieren können.

Der Lehrplan des Gymnasiums ist in der siebten und achten Jahrgangsstufe bezüglich des Faches Physik sehr ähnlich dem der Realschule. Die Schüler lernen in „Natur und Technik“ bzw. im Physikunterricht die gleichen Begriffe kennen. Daher eignen sich die im Teilkapitel 2.2.3 vorgestellten Raketenmodelle und Experimente mit denselben Begründungen genauso für den gymnasialen Unterricht.

Der Physikunterricht der neunten Klasse beschäftigt sich mit „Kinematik und Dynamik geradliniger Bewegungen“¹⁰. Als Beispiel einer geradlinigen Bewegung kann man Raketenmodelle vorführen, die an einer Schnur geführt werden. Hierfür stehen der Lehrkraft mehrere Modelle zur Verfügung. Beispielsweise ein an einem gespannten Faden befestigter Luftballon, der nach Öffnen seines Verschlusses an diesem entlang saust oder auch die CO₂-Rakete (siehe Kapitel 5.5).

Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, kann man mit Lichtschranken die Zeiten messen, die die Raketen für bestimmte Strecken benötigen und Übungsaufgaben zum Thema Kinematik und Dynamik mit den entsprechenden Werten berechnen.

Weitere Themen, die durch Raketenstarts anschaulich gestaltet werden können, finden sich in der zehnten Jahrgangsstufe des Gymnasiums. Hier werden die Gesetze NEWTONS wiederholt und

⁹ Lehrplan für das bayerische Gymnasium 2009, Jgst. 5 „Natur und Technik“

¹⁰ Lehrplan für das bayerische Gymnasium 2009, Jgst. 9 Physik

genauer untersucht. Das dritte Newtonsche Gesetz wird sich jeder Schüler und Schülerin besser verinnerlichen können, wenn er einmal über die Funktionsweise einer Rakete nachdenkt. Diese macht sich das Wechselwirkungsgesetz zu Nutze, auch drittes Newtonsche Axiom genannt. Es werden also in diesem Fall abermals die Modelle als Veranschaulichung der Theorie fungieren. Außerdem fordert der Lehrplan, dass die Schüler und Schülerinnen Experimente zu den Gesetzen NEWTONS durchführen und diese entweder als Simulation oder in Berechnungen analysieren.

„In erster Linie bestimmen sie die wirkenden Kräfte, interpretieren aus physikalischer Sicht kritisch die sich z. B. aus Simulationen ergebenden Ergebnisse und vergleichen diese mit entsprechenden experimentellen Daten.“¹¹

Diese experimentellen Daten können z.B. Raketenflüge liefern, die mit Videokameras aufgenommen und am Computer ausgewertet werden. Der Lehrer oder die Lehrerin kann den Lernenden bei diesen Experimenten so viel Freiheit geben wie möglich. Denn für diese Art von Versuch können die verschiedensten Raketenmodelle auf unterschiedlichste Weise verwendet werden, je nachdem, was untersucht werden soll. Dies ist wiederum vom Interesse der jungen Forscher abhängig. Egal, ob nun das Augenmerk z.B. auf die Schubkraft oder die Flugbahn gerichtet ist, es wird sicherlich für jeden etwas Ansprechendes dabei sein. Ein Beispiel für ein computergestütztes Experiment, welches im Gymnasium durchgeführt wurde, wird in Kapitel 4.3 beschrieben.

Im Lehrplan wird überdies die Konstruktion von Modellraketen vorgeschlagen, damit die Schüler und Schülerinnen ihr Grundwissen über Probleme aus der Dynamik vertiefen.

„Probleme aus der Dynamik
[...] Bau von Modellraketen, Vermessung der Flughöhe [...]“¹²

Erst in der zwölften Jahrgangsstufe stößt man im Lehrplan wieder auf Themen, die durch Demonstrationen oder der Behandlung von Raketenflügen bereichert werden können. Die Schüler und Schülerinnen haben in diesem Schulabschnitt erstmals die Wahl zwischen dem regulären Physikunterricht der elften und zwölften Klassenstufe oder einer Lehrplanalternative. Dies ist in der elften Jahrgangsstufe „Biophysik“ und in der zwölften „Astrophysik“.

Zwangsläufig kommt man im Bereich der Astrophysik auch auf die Raumfahrt zu sprechen, wobei der Lehrplan auf Raumsonden und Satelliten verweist. Es spricht natürlich nichts dagegen auch die Raketen ins Spiel zu bringen. Wobei das Niveau, mit dem man die Raketenphysik bespricht, entsprechend hoch sein sollte. Mit dem Bau einer Modellrakete als Schülerprojekt kann man zwar die Schüler und Schülerinnen höchstwahrscheinlich immer noch begeistern, jedoch wird von ihnen

¹¹ Lehrplan für das bayerische Gymnasium 2009, Jgst. 10 Physik

¹² Lehrplan für das bayerische Gymnasium 2009, Jgst. 10 Physik

verlangt, dass sie in der Sekundarstufe II wissenschaftlich arbeiten. Dies erfordert also anspruchsvolle Messungen und Auswertungen, wenn möglich mit Computerprogrammen. Man könnte z.B. näher auf das Thema „Flugbahnen“ eingehen, die von Raumschiffen gewählt werden müssen, um auf Mond oder Mars sicher landen zu können. Dazu könnte man Berechnungen und Simulationen durchführen lassen und Applets verwenden, die es ermöglichen wie in Computerspielen Raumfahren geschickt durch das All fliegen zu lassen.

Der Einsatz des Computers wird wie bereits erwähnt an vielen Stellen im Lehrplan gefordert.

„Zum Studium unterschiedlicher Bahnformen setzen die Schüler Computersimulationen ein.“¹³

Die heutigen Schüler und Schülerinnen sind computertechnisch meist so fit, dass man ihnen die Aufgabe zutrauen kann, solche Applets zu programmieren und darüber beispielsweise eine Seminararbeit zu schreiben.

2.3 Rechtliche Einschränkungen bei Raketenstarts

Wo und wie eine Rakete gestartet werden darf, ist abhängig von ihrer Bauart und dem verwendeten Treibstoff. Es gibt gewisse Gesetze betreffend des Abstandes zu bewohnten Gebieten, den der Raketenstarter einhalten muss. Die folgenden rechtlichen Vorgaben sind der Internetseite der Modellraketenfirma modellraketen.de¹⁴ entnommen.

In Deutschland ist es Personen unter 18 Jahren nicht erlaubt ganzjährig Modellraketenmotoren zu kaufen und zu verwenden. Ab 14 Jahren dürfen Jugendliche unter Aufsicht von Erwachsenen Modellraketenmotoren benutzen. Das bedeutet für den Schuleinsatz, dass zwar Modellraketen mit Treibsätzen von den Schülern und Schülerinnen gebaut werden dürfen, sie aber nur unter Aufsicht der Lehrkraft mit einem speziellen Raketenmotor gezündet werden dürfen. Als erwachsene Aufsichtsperson ist es unbedingt nötig, die Jugendlichen auf diese Gesetze hinzuweisen und den Start z.B. an einem Projekttag zusammen mit den Schülern und Schülerinnen durchzuführen.

Eine Genehmigung für Raketen, deren Flughöhe nicht mehr als 800 m beträgt, ist in unkontrollierten Lufträumen nicht zwingend notwendig. Ob ein Luftraum unkontrolliert ist, muss man jedoch beim zuständigen Luftamt in Erfahrung bringen, da dies von Region zu Region unterschiedlich sein kann.

Zu einem Flugplatz muss ein Mindestabstand von 1,5 km eingehalten werden und auch in der Nähe von Krankenhäusern und Altenheimen, sowie in geschlossenen Ortschaften ist der Start von

¹³ Lehrplan für das bayerische Gymnasium 2009, Jgst. 11/12 Physik

¹⁴ www.modell-raketen.de/modellraketencodex.asp

Modellraketen nicht erlaubt. Die gesetzlich vorgeschriebene Entfernung zu bewohntem Gebiet beträgt 300 m.

Lässt man sein Modell auf einer Wiese oder Ackerland starten, muss man vorher den Grundstückbesitzer nach seiner Erlaubnis fragen. Dies ist aber erfahrungsgemäß kein Problem, wenn man ihn vorher daraufhin weist, dass man mit dem Start einer Modellrakete keinen Schaden auf nicht brennbarem Untergrund anrichten kann. In der näheren Umgebung des Start- und Landeplatzes dürfen sich darüber hinaus keine Hochspannungsleitungen oder Bäume befinden.

Es ist strengstens verboten, ohne Erlaubnis Treibsätze zu bündeln oder sie mehrstufig anzuordnen. Um Treibsätze mit mehr als 20 g Treibstoffgewicht zu kaufen oder Treibsätze bündeln zu können, sowie zum Flug von Mehrstufenraketen, muss man sich eine spezielle Erlaubnis nach §27 des Sprengstoffgesetzes besorgen.

Neben den gesetzlich vorgeschriebenen Einschränkungen gibt es auch den sogenannten IMR Sicherheitskodex, der von jedem Modellraketenbauer freiwillig eingehalten werden sollte. Er dient dazu, Unfälle zu vermeiden. Den vollständigen IMR Sicherheitskodex ist dieser Zulassungsarbeit angehängt (siehe 10.1). Es ist zu beachten, dass dieser Sicherheitskodex nur für Raketen gilt, die maximal mit der Stärke G ($1G = \text{einfache Erdbeschleunigung von } 9,81 \text{ m/s}^2$) fliegen. Für Raketen, die mit mehr als der Stärke G fliegen, tritt der IMR High-Power Sicherheitskodex in Kraft. Diese Raketen finden jedoch aufgrund ihrer Gefährlichkeit keine Verwendung in der Schule.

3 Theorie der Raketenphysik

In diesem Kapitel wird beschrieben, welche Physik hinter einem Raketenstart steckt. Wie schafft es die Rakete abzuheben und welche Kräfte sind dafür verantwortlich?

Die Modelle funktionieren alle nach dem dritten Newtonschen Gesetz, das auch unter dem Namen „Wechselwirkungsprinzip“ bekannt ist. Spricht man vom Antrieb, fällt sehr oft der Begriff des „Rückstoßes“, eine Anwendung des Wechselwirkungsprinzips.

Für Berechnungen der Schubkraft oder der Höhe, die die Flugobjekte erreichen, benötigt man die Raketengleichung. Im Kapitel 4.1 wird ihre experimentelle Herleitung zu finden sein.

3.1 Das dritte Newtonsche Gesetz und das Rückstoßprinzip

Im Jahre 1687 machte sich der englische Naturwissenschaftler SIR ISAAC NEWTON daran, seine Erkenntnisse über die Kräfte, wie sie in der Umwelt zu beobachten waren, aufzuschreiben und sie als Axiome zu formulieren. Diese Axiome sind nicht im mathematischen Sinne zu verstehen, d.h. als Ergebnis reinen Denkens, sondern sind aus Beobachtungen im Alltag entstanden und deren Gebrauch im wirklichen Leben stets gültig sind.¹⁵

Newton postulierte drei Axiome, die Bewegung in Abhängigkeit von Kräften beschreiben. Für die Raketenphysik ist vor allem das dritte Gesetz von Bedeutung. TIPLER formulierte es folgendermaßen:

„Kräfte treten immer paarweise auf. Wenn der Körper A eine Kraft $\mathbf{F}^{(A)}_B$ auf den Körper B ausübt, wirkt eine gleich große, aber entgegengesetzt gerichtete Kraft $\mathbf{F}^{(B)}_A$ von dem Körper B auf den Körper A. Somit gilt: $\mathbf{F}^{(B)}_A = -\mathbf{F}^{(A)}_B$ “¹⁶

Übertragen auf unsere Rakete heißt das, dass sie mit der gleichen Kraft nach oben gedrückt wird, mit der der Treibstoff nach unten ausgestoßen wird (siehe Abb.1). Die Kraft, die den Raketenkörper nach oben beschleunigt wird Schubkraft genannt. Im Kapitel 3.2 wird anhand der Raketengleichung gezeigt, dass diese Kraft von der ausströmenden Masse, d.h. dem Treibstoff, sowie der Ausströmgeschwindigkeit des Treibstoffs abhängig ist. Kurz gesagt, sie wird umso größer, je höher die Ausströmgeschwindigkeit ist und je mehr Masse nach unten ausgestoßen wird.

¹⁵ Vgl. HÖFLING, O.: *Physik Band II Teil 1*, Dümmler 1978, S. 73

¹⁶ TIPLER, P.A.; MOSCA, G.: *Physik – Für Wissenschaftler und Ingenieure*, Spektrum Akademischer Verlag, 2004, S. 78

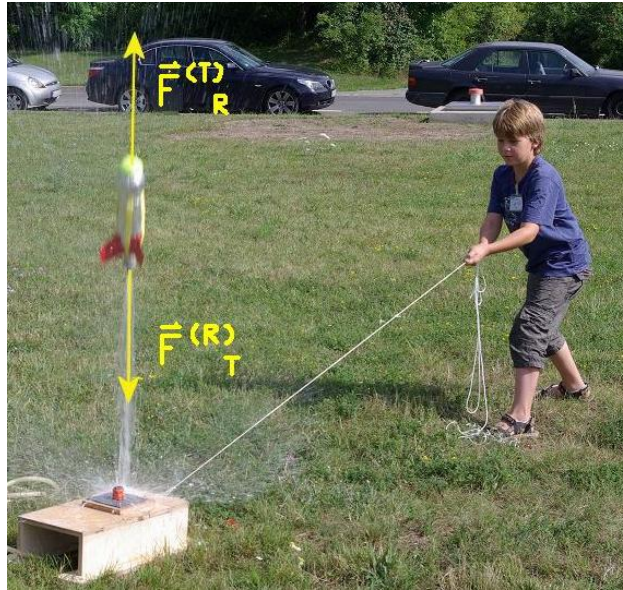


Abb. 1: Raketenstart mit Kraftvektoren

3.2 Raketengleichung nach ZIOLKOWSKI¹⁷

Der russische Physiker K. E. ZIOLKOWSKI schrieb als Erster die Beschreibung der Bewegung einer Rakete als Gleichung nieder, welche nach ihm benannt wurde. Bei einer Rakete handelt es sich um einen sich bewegenden Körper, dessen Masse während des Fluges abnimmt. Die Abnahme des Treibstoffs und somit die Abnahme der Gesamtmasse einer Rakete darf bei der Darstellung ihrer Bewegung nicht vernachlässigt werden.

In der kommenden Ausführung der Ziolkowski-Raketengleichung gelten folgende vereinfachende Bedingungen:

1. Auf die Rakete wirken keine äußeren Kräfte, d.h. der Luftwiderstand und die Gravitation sollen vernachlässigt werden
2. Die Rakete startet aus der Ruhelage, d.h. zur Zeit $t=0$ ist die Geschwindigkeit $v_0=0$.

Für die Anfangsmasse m_0 der Rakete gilt:

$$m_0 = m_e + m_T$$

wobei m_e die gesamte übrige Masse der Rakete und ihrer Nutzlast ist und *Leermasse* genannt wird. m_T bezeichnet die *Masse des Treibstoffs*. Es wird vorausgesetzt, dass während des Raketenfluges in gleichen Zeitintervallen Δt immer die gleiche Gasmasse Δm ausgestoßen wird. Der *Durchsatz* oder die *Abbrandgeschwindigkeit* der Rakete wird mit der konstanten Größe μ bezeichnet:

$$\mu = \frac{\Delta m}{\Delta t}$$

¹⁷ Vgl. HÖFLING, O.: *Physik ...* S. 178-181

Diese Definition liefert die Einheit der Abbrandgeschwindigkeit, welche als Kilogramm durch Sekunde ($\frac{kg}{s}$) angegeben wird. Die Zeit, die vergeht bis der gesamte Treibstoff verbraucht wurde, nennt man die *Brenndauer* T . Es gilt dann für die Abbrandgeschwindigkeit:

$$\mu = \frac{m_T}{T}$$

Für die Masse m_t einer Rakete zu einer beliebigen Zeit gilt dann:

$$m_t = m_0 - \mu t = m_0 - \frac{m_T}{T} t$$

v_t sei der *Geschwindigkeitsbetrag der Rakete* relativ zur Erde zur Zeit t . In dem nun betrachteten Zeitintervall Δt wird die Gesamtmasse $\mu \cdot \Delta t$ von der Rakete ausgestoßen. Diese hat den *Ausströmgeschwindigkeitsbetrag* c relativ zur Rakete. Ihr Geschwindigkeitsbetrag relativ zur Erde kann man als $|c - v_t|$ beschreiben. Dadurch, dass die Rakete Gas ausstößt, erfährt sie eine Geschwindigkeitszunahme Δv . Die Masse der Rakete beträgt also am Ende des betrachteten Zeitintervalls Δt

$$m_t - \mu \cdot \Delta t$$

und der Geschwindigkeitsbetrag der Rakete

$$v_t + \Delta v.$$

Die *Impulse der Rakete und der Gasmasse* am Ende des Zeitintervalls Δt werden dann wie folgt beschrieben:

$$p_{Rakete} = (m_t - \mu \cdot \Delta t)(v_t + \Delta v)$$

$$p_{Gas} = -\mu \cdot \Delta t \cdot (c - v_t) \quad \text{wenn } c > v_t$$

Laut dem Impulserhaltungssatz ist die Summe der Impulse von Rakete und Gas gleich dem Impuls zu Beginn des betrachteten Zeitintervalls Δt

$$p_t = m_t + v_t$$

Es gilt also:

$$m_t + v_t = (m_t - \mu \cdot \Delta t)(v_t + \Delta v) - \mu \cdot \Delta t \cdot (c - v_t)$$

oder

$$m_t \cdot \Delta v - \mu \cdot \Delta t \cdot w - \mu \cdot \Delta t \cdot \Delta v = 0$$

Das betrachtete Zeitintervall Δt wird sehr klein gewählt; dann ist auch Δv entsprechend klein. Das Produkt $\Delta t \cdot \Delta v$ kann dann gegenüber den anderen Gliedern der vorausgegangenen Gleichung vernachlässigt werden. Daraus folgt also:

$$m_t \cdot \Delta v = \mu \cdot \Delta t \cdot c$$

oder

$$m_t \frac{\Delta v}{\Delta t} = \mu c$$

Der Ausdruck

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = a$$

stellt die *Beschleunigung der Rakete* dar. Daher ist

$$F_S = m_t a = \mu c$$

die Kraft, die die Rakete beschleunigt. Sie wird auch als *Vortrieb* oder *Schub der Rakete* bezeichnet. Diese Größe ist abhängig vom Raketentriebwerk. Der *Abbrandgeschwindigkeitsbetrag* μ und der *Ausstoßgeschwindigkeitsbetrag* c sind für ein bestimmtes Raketentriebwerk konstant. Deswegen ist auch die Schubkraft eine konstante Eigenschaft einer Rakete. Die Beschleunigung der Rakete ist jedoch nicht konstant. Sie nimmt mit abnehmender Raketenmasse zu und ist beim Brennschluss am größten.

Das höchste Ziel beim Modellraketenbau ist es eine möglichst schnelle, hochfliegende Rakete zu konstruieren. Mit einer anderen Formulierung der Ziolkowski-Raketengleichung kann man erkennen, wovon die Höchstgeschwindigkeit v_e abhängt und kann dies dementsprechend bei der Entwicklung eines Konstruktionsplans beachten.

Führt man in der in der Gleichung

$$m_t \cdot \Delta v = \mu \cdot \Delta t \cdot c$$

Den Grenzübergang $\Delta t \rightarrow 0$ aus, erhält man

$$m_t dv = \mu c dt$$

Mit

$$m_t = m_0 - \mu t$$

folgt

$$(m_0 - \mu t) dv = \mu c dt$$

oder

$$dv = c \frac{\mu dt}{m_0 - \mu t}$$

m_0 ist eine konstante Größe und deshalb gilt:

$$\frac{d(m_0 - \mu t)}{dt} = -\mu$$

Integriert man nun, erhält man:

$$v_t = -c \cdot \ln(m_0 - \mu t) + C$$

Aufgrund der Anfangsbedingung $t = 0, v_t = 0$ ergibt sich für die Integrationskonstante C die Gleichung

$$0 = -c \cdot \ln m_0 + C \quad \text{oder} \quad C = c \cdot \ln m_0$$

Damit ist also

$$v_t = c(\ln m_0 - \ln(m_0 - \mu t)) = c \cdot \ln \frac{m_0}{m_0 - \mu t} = c \cdot \ln \frac{m_0}{m_t}$$

Hiermit lässt sich zu jeder beliebigen Zeit t die Geschwindigkeit der Rakete bestimmen. Wie bereits erwähnt, ist die Geschwindigkeit, die die Rakete nach Abbrennen des kompletten Treibstoffs hat, also ihre Höchstgeschwindigkeit, von besonderem Interesse.

Zu diesem Zeitpunkt gilt:

$$m_t = m_e$$

Daraus ergibt sich:

$$v_e = c \cdot \ln \frac{m_0}{m_e}$$

Die für den Raketenbau hieraus gewonnene Erkenntnis lautet also, dass man die Geschwindigkeit einer Rakete nur erhöhen kann, indem man den Ausströmungsgeschwindigkeitsbetrag der Verbrennungsgase erhöht oder die Startmasse des Geschosses verringert.

Eine Erhöhung des Ausströmungsgeschwindigkeitsbetrags kann man z.B. dadurch erreichen, dass die Antriebsdüse der Rakete enger gebaut wird. Dies ist aber nur bis zu einer gewissen Enge möglich, da sonst die Zündung des Treibstoffs zu einer Explosion führen kann, da ein zu großer Druck im Treibstoffbehälter aufgebaut wurde. Der Treibsatz muss eine genügend große Öffnung haben um die Gase entweichen lassen zu können.

4 Ausgewählte Experimente mit Raketenmodellen in der Literatur

Dass Raketen vor allem zur Veranschaulichung des dritten Newtonschen Gesetzes genutzt werden, wurde in den vorhergehenden Kapiteln des Öfteren genannt. Da der Start eines Modells in diesem Fall selbst schon das Experiment ist, werden im Folgenden weitere wichtige Versuche mit Raketen vorgestellt, die sich mit der experimentellen Herleitung der Raketengleichung und der Untersuchung der Schubkraft beschäftigen. Außerdem wird noch kurz auf den Graphen der Weg-Zeit-Funktion eines Raketenfluges eingegangen sowie dessen computergestütztes Ausmessen und Modellieren beschrieben. Die Experimente wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht nachgemacht.

4.1 Experimente mit dem Kugelraketenwagen¹⁸

Im Folgenden wird die Abhängigkeit des Endgeschwindigkeitsbetrages v_e von Raketen vom Austrittsgeschwindigkeitsbetrag des Treibstoffs c und der Masse des Treibstoffs m_T mit Hilfe eines Kugelraketenwagens untersucht. Er besteht aus einer Rinne, die auf einem Wagen befestigt ist und auf der Kugeln herunterrollen können. Die Kugeln treten waagrecht aus und der Wagen bewegt sich dann entgegen ihrer Austrittsrichtung. Im Artikel „Behandlung der Raketenphysik auf der Oberstufe“ von WEISS wird zudem noch die Auswirkung der Größe der Kugeln auf den Endgeschwindigkeitsbetrag geprüft. Diese Betrachtung wird in dieser Arbeit nicht vorgestellt, da es sich beim Treibstoff der im Kapitel 5 vorgestellten Raketenmodelle entweder um Flüssigkeit oder Gas handelt und somit nur seine Masse relevant ist nicht aber seine Form. Die Raketengleichung, die im Kapitel 3.2 vorgestellt wurde, wird hier mit Untersuchungen an einem Wasserraketenwagen experimentell hergeleitet.

4.1.1 Abhängigkeit des Endgeschwindigkeitsbetrages v_e vom Austrittsgeschwindigkeitsbetrag c

Der Betrag der Austrittsgeschwindigkeit c der Kugeln kann durch Variation der Fallhöhe der Kugeln verändert werden. Über den waagrechten Wurf wird der Austrittsgeschwindigkeitsbetrag c ermittelt, wobei hier die Bedingung erfüllt sein muss, dass der Kugelwagen im Stand bleibt, da sonst die Definition der Austrittsgeschwindigkeit nicht eingehalten würde. Der Wagen wird an-

¹⁸ Vgl. WEISS, D.: *Behandlung der Raketenphysik auf der Oberstufe* – In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, 1972, Band 25, Heft 1, S. 22-24

schließlich nicht mehr festgehalten und fährt durch eine Lichtschranke mit deren Hilfe man die Geschwindigkeitsbetrag v_e bestimmen kann.

Aus den Messergebnissen lässt sich die direkte Proportionalität

$$v_e \sim c$$

erkennen. Die Theorie besagt:

$$v_e = \frac{m_K}{m_K + m_e} \cdot c$$

Diese Formel macht deutlich, dass v_e und c nur vom *Massenverhältnis* abhängt und nicht von den absoluten Werten von Kugel- und Kugelwagenmasse. Sie zeigt außerdem, dass der Endgeschwindigkeitsbetrag v_e zunimmt wenn die Kugelmasse m_K vergrößert oder die Wagenmasse m_e verkleinert wird. Dies konnte von WEISS im Experiment bestätigt werden.

4.1.2 Abhängigkeit des Endgeschwindigkeitsbetrages v_e von der Anzahl der Kugeln

Es wird nacheinander die Anzahl der Kugeln, die die Rinne herunterrollen, erhöht. Es handelt sich hierbei um gleichschwere und gleichgroße Kugeln. Auch hier erfolgt die Bestimmung des Endgeschwindigkeitsbetrages mit einer Lichtschranke. Der Betrag der Austrittsgeschwindigkeit c der Kugeln bleibt im gesamten Versuch gleich. Das Experiment liefert als Ergebnis, dass der Endgeschwindigkeitsbetrag zwar mit der Anzahl der Kugeln zunimmt, jedoch nicht direkt proportional. Es ergibt sich, dass man den Betrag der Endgeschwindigkeit mit folgender Formel beschreiben kann:

$$v_e^{(n)} = c \cdot \sum_{l=1}^n \frac{m_K}{lm_K + m_e}$$

4.2 Experimentelle Herleitung der Raketengleichung mit einem Wasserraketenwagen

In den folgenden Experimenten kommt ein Wasserraketenwagen zum Einsatz. Der Tank des Modells ist eine Konservendose mit einem Fassungsvermögen von 1,5 l. In ihrem Boden ist ein Autoventil befestigt, das an einen Schlauch angeschlossen wird, durch welchen später die Druckluft eingefüllt wird. Der abnehmbare Deckel ist mit einem gebogenen Kupferrohr versehen, das mit einem Klappverschluss verschlossen ist. Der Druck wird benötigt, da der Betrag der Ausströmgeschwindigkeit c des Wassers sehr klein wäre, wenn dieses nur aufgrund der Wirkung der Schwerkraft ausfließen würde.

Für die Herleitung der Raketengleichung ist es unbedingt notwendig, dass der Ausströmgeschwindigkeitsbetrag c während des gesamten Versuches gleich bleibt. Sie hängt vom Schweredruck des Wassers, also der Höhe des Wasserstandes h und dem Pressluftüberdruck p_{ii} ab. Das heißt, der Betrag der Ausströmgeschwindigkeit bleibt nur dann konstant, wenn der Pressluftüberdruck konstant bleibt. Der Schweredruck kann gegenüber diesem vernachlässigt werden. Da sich beim Austreten des Wassers aus dem Tank das Pressluftvolumen vergrößert, verkleinert sich der Pressluftüberdruck. Dies kann man einschränken, indem das Volumen des Wassers V_a klein gegenüber des Fassungsvermögen V des Tanks wählt ($V_a \ll V$). Dies ist auch dann der Fall, wenn der Wasserstand eine Höhe h besitzt, die gegenüber der Höhe H des Tanks klein ist ($h \ll H$). Diese Bedingung wird mit einer Ausströmmasse m_T bis zu 0,2 kg gewährleistet. Der Ausströmgeschwindigkeitsbetrag c hängt dann nur von der Pressluft und nicht vom Schweredruck des Wassers ab und ist daher während dem gesamten Versuchsablauf nahezu konstant.

Die Funktion f des Endgeschwindigkeitsbetrages v_e , die vom Betrag der Ausströmgeschwindigkeit c des Treibstoffes, von der Startmasse m_0 der Rakete beim Start sowie der Masse m_t der Rakete zur Zeit t nach dem Start abhängt, wird im Experiment genauer erforscht.

$$v_e = f(c, m_0, m_t)$$

Im vorhergehenden Teilkapitel wurde die direkte Proportionalität zwischen den Beträgen der Endgeschwindigkeit v_e und der Ausströmgeschwindigkeit c aufgezeigt. Somit darf geschrieben werden:

$$v_e = c \cdot f(m_0, m_t)$$

oder

$$\frac{v_e}{c} = f(m_0, m_t)$$

Um die Funktion f zu bestimmen, wird folgender Versuch durchgeführt:

Der Tank des Wasserraketenwagens wird mit Wasser der Masse m_T und Pressluft des Überdruckes $p_{ii} = 1$ at gefüllt. Mit den Zusatzmassen von 0,5 kg, 1,0 kg und 2,0 kg kann die Leermasse m_e Werte von 1,1 kg bis 3,1 kg annehmen und somit die Startmasse $m_0 = m_e + m_T$ zwischen 1,1 kg und 3,3 kg variiert werden. Mit einer Lichtschranke wird der Betrag der Endgeschwindigkeit v_e ermittelt. Die Messergebnisse werden graphisch dargestellt. Dazu wird der Quotient $\frac{v_e}{c}$ aus Endgeschwindigkeit und Ausströmgeschwindigkeit in Abhängigkeit zum Quotienten $\frac{m_0}{m_e}$ aus Startmasse und Leermasse betrachtet. Die Kurve $\left(\frac{v_e}{c} \rightarrow \frac{m_0}{m_e}\right)$ (siehe Abb. 2) wird als Graph einer logarithmischen Funktion interpretiert:

$$\frac{v_e}{c} = \log_b \frac{m_0}{m_e}$$

Als Basis ergibt sich die Eulersche Zahl e . Somit erhält man die Gleichung:

$$v_e = c \cdot \ln \frac{m_0}{m_e}$$

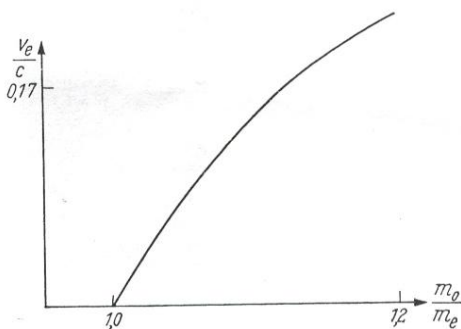


Abb. 2: Experimentell gefundener Graph¹⁹

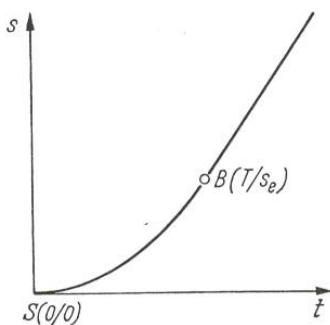
Um nun auf die Form der Ziolkowski-Raketengleichung zu gelangen, in der der Geschwindigkeitsbetrag v_t zu jedem beliebigen Zeitpunkt t während des Raketenfluges betrachtet wird, muss man davon ausgehen, dass er, wenn aus dem Raketenwagen Wasser der Masse m_T ausgeströmt ist, noch die Masse m_t und bereits die Geschwindigkeit v_t besitzt. Die Zeit t ist durch den Start (S) und den Brennschluss (B) begrenzt. Die Geschwindigkeit v_t wird gegeben durch:

$$v_t = c \cdot \ln \frac{m_e}{m_t}$$

Mit Hilfe von Zeitmarkengebern wurden Marken auf Metallpapier geschrieben (Kurzzeitmessung mit Metallpapier), so dass damit der Graph der Weg-Zeit-Funktion aufgenommen werden konnte. Dazu ließ WEISS den Wasserraketenwagen starten, der eine Lichtschranke unterbrach wobei diese Unterbrechung den Zeitmarkengeber einschaltete und dieser die erste Marke (Nullmarke) zeichnete. Heutzutage würde man die Auswertung dieses Experimentes höchstwahrscheinlich mit dem Computer durchführen, der mit Hilfe eines entsprechenden Programmes die Daten sogleich als Graph der Weg-Zeit-Funktion darstellt.

Anhand des ausgewerteten Graphen (siehe Abb. 3) lässt sich erkennen, dass zwischen Start (S) und Brennschluss (B) der Raketenwagen durch die konstante Schubkraft F_S beschleunigt wird. Jedoch ist die Bewegung keine gleichmäßig beschleunigte, da die Masse des Wagens während des Versuchsablauf abnimmt. Nach dem Brennschluss erfährt die Rakete keine weitere Beschleunigung und hat nach der Strecke s_e den Geschwindigkeitsbetrag v_e erreicht, mit der sie sich gleichförmig weiterbewegt.

¹⁹ WEISS, D.: *Behandlung der Raketenphysik in der Oberstufe* – In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, 1972, Band 25, Heft 1, S. 25

Abb. 3: Weg-Zeit-Kurve²⁰

Im Graphen lässt sich dies als Übergang der Kurve mit endlicher Krümmung in eine Gerade am Punkt B erkennen. Dem Graphen kann man die Brenndauer T , den Fahrtweg s_e sowie die Endgeschwindigkeit v_e als Steigung des geradlinigen Kurventeils entnehmen. Der jeweilige Geschwindigkeitsbetrag v_t zur Zeit t lässt sich aus dem Steigungswert im entsprechenden Punkt des gekrümmten Kurventeils berechnen.

4.3 Bestimmung der Schubkraft einer Rakete²¹

Die Kraft, die eine Rakete benötigt, um aufsteigen zu können, nennt man Schubkraft. Sie muss für eine kurze Zeit größer sein, als die Gewichtskraft der Rakete. In diesem Versuch wird abermals mit dem obigen Wasserraketenwagen gearbeitet. Die Schubkraft eines Modells wird mit einem Schubmeter gemessen. Es besteht aus einem Pendel, das durch den auftreffenden Massestrahl, hier der Wasserstrahl des Wagens, abgelenkt wird. Je mehr das Pendel vom Strahl abgelenkt wird, desto höher ist die Schubkraft des untersuchten Modells. Der Versuch wird mit Hilfe des Schubmeters den experimentellen Beweis für den Zusammenhang zwischen Schubkraft F_S , Ausströmgeschwindigkeitsbetrag c , Ausströmmasse m_T und Ausströmzeit T liefern.

Der Tank des Raketenwagens wird mit Wasser der Masse m_T gefüllt und anschließend an eine Luftpumpe mit Druckanzeige angeschlossen. Öffnet man nun die Ausströmdüse, prallt das Wasser auf die Fläche des Pendels und lenkt es aus. Für das Experiment werden zwei Versuchsreihen mit den Ausströmmassen m_T zwischen 0 und 1,5 kg bei gleichbleibendem Ausströmgeschwindigkeitsbetrag c , also bei konstantem Pressluftdruck $p_{\text{ü}}$ und der Betrag der Ausströmgeschwindigkeit c bei gleichbleibender Ausströmmasse m_T zwischen 0 und $9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ variiert. Dabei wird die Schubkraft F_S und die Ausströmzeit T gemessen. Der Versuch liefert die Gleichung für den Schub F_S :

$$F_S = c \cdot \frac{m_T}{T}$$

²⁰ WEISS, D.: *Behandlung der Raketenphysik* ... S. 26

²¹ Vgl. WEISS, D.: *Behandlung der Raketenphysik*... S. 26-27

Es ist anzumerken, dass die Bedingungen gelten müssen, dass der Betrag der Ausströmgeschwindigkeit c und die Ausströmdauer T konstant bleiben.

4.4 Messen und Modellieren des Fluges einer Wasserrakete²²

Das deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt, kurz DLR, bietet seit einigen Jahren in verschiedenen Städten Deutschlands Schülerlabore zu den Themengebieten der Luft- und Raumfahrt an. Diese so genannten DLR_School_Labs geben den Schülern und Schülerinnen Einblicke in die aktuelle Luftfahrt-, Raumfahrt-, Energie- und Verkehrsforschung und gibt ihnen die Möglichkeit unterschiedliche Schülerexperimente zu ausgewählten Inhalten durchzuführen.

Zu diesen Versuchen gehört auch das Messen und Modellieren eines Raketenfluges, welches den Kindern das Raketenprinzip veranschaulicht. Das Experiment kann auf das jeweilige Anforderungsniveau der Lernenden angepasst werden und wird von ihnen selbstständig in Gruppenarbeit durchgeführt.

Der folgende Versuch soll laut DLR eine Anregung für Lehrer und Lehrerinnen sein, solche Art von Forschungsarbeit auch in den Schulen auszuprobieren. Die DLR schlägt für eine Mittelstufen-Klasse diese Projektarbeiten mit Hilfe des Wasserraketenmodells vor:

„Zusammenbau einer Wasserrakete, Einführung des Impulsbegriffes, Erklärung des Rückstoßprinzips, Abschätzung der Ausstoßgeschwindigkeit des Wassers, des Brennschlusses und des Raketenschubs, Start der Rakete, Höhenmessung durch Triangulation, Optimierung Verhältnis Wasser/Druckluft durch Variation der Größen bei mehreren Starts, Videoaufzeichnung der Flugbahn, Einzelbilddauswertung, Erstellen der $s(t)$ -Diagramme mit Excel.“²³

Für die Oberstufe werden folgende Aufgaben empfohlen:

„Ableitung Raketengleichung, Integration mittels Excel-Sheet, Parametervariation, Simulation von $s(t)$ -, $v(t)$ - und $a(t)$ -Diagrammen, Start der Rakete, Höhenbestimmung durch Triangulation, Videoaufzeichnung Flugbahn, Einzelbilddauswertung, Erstellen von $s(t)$ -, $v(t)$ - und $a(t)$ -Diagrammen mit Excel, Vergleich Simulation - Messung.“

Die numerische Integration wird mit Hilfe von Tabellenkalkulation in Excel durchgeführt, da die Schüler und Schülerinnen meistens die analytische Integration der Raketengleichung nicht beherrschen. Es werden für den Schuleinsatz bereits fertige Spreadsheets mit Raketenmodellen zur Verfügung gestellt.²⁴

²² Vgl. BRÄUCKER, R.;GÖRLICH, H.;HEISLBETZ, B.: *Forschung zum Anfassen und Erleben-Einblicke in die DRL_School_Labs* – IN: Unterricht Physik, 2005, Nr. 90, S. 180-181

²³ BRÄUCKER, R.;GÖRLICH, H.;HEISLBETZ, B.: *Forschung zum Anfassen und Erleben...*S. 180-181

²⁴ z.B.: REGENBRECHT, T.: *Tabellenkalkulation oder Simulationsprogramm? Grundlegung und Vergleich der Simulation dynamischer Systeme im Physikunterricht der Jahrgangsstufe 11 des Gymnasiums am Beispiel der Unterrichtseinheit „Raketenbewegung“*, Staatsexamensarbeit, 2000; oder RIEHLE, J.: *Rakete mit Excel, Neue Medien im Physikunterricht*, LEU Stuttgart, 2003

Nun zum eigentlichen Versuch „Messen und Modellieren eines Raketenflugs“. Eine Wasserrakete wird gestartet und deren Flug mit dem eines theoretischen Modells verglichen. Eine Gruppe von Schüler und Schülerinnen steht etwas abseits des Startplatzes und wird mittels Triangulation die erreichte Höhe der Rakete messen. Dazu peilen sie mit dem „Altitude Calculator“ oder dem „Altitude – Tracker“²⁵, beides Hilfsgeräte zur Bestimmung der Flughöhe, die Flugbahn an und halten den Winkel im Apogäum, also dem größten Abstand zur Erde, der Bahnkurve fest. Der „Altitude Calculator“ liefert sofort die Höhe der Wasserrakete. Höhere Jahrgangsstufen sollen dagegen die Steighöhe aus dem Apogäumwinkel und dem Abstand zur Startrampe berechnen. Hierbei müssen die Jugendlichen jedoch ihre Augenhöhe mit einkalkulieren, damit die Ergebnisse nicht verfälscht werden.

Der Flug wird über Videoaufzeichnung und Einzelbildauswertung ausgewertet. Die richtige Einstellung der Kamera spielt dabei eine wichtige Rolle. Die Bildrate von 25 fps sollte wenn möglich nicht unterschritten werden, am besten eignet sich eine Bildrate von 50 fps, also eine Zeitauflösung von 0,02 s. Mit einem Player mit Einzelbildauflösung (z.B. Quicktime-Movieplayer) können die Schüler und Schülerinnen ihren Videofilm analysieren. Mit Hilfe eines Grafikprogramms wie z.B. Gimp oder mit einem Lineal anhand der ausgedruckten Aufnahmen kann die Steighöhe bestimmt werden. Zusätzlich hilft ein Meterstab, der neben der Startrampe aufgestellt ist für die Analyse des erforderlichen Maßstabsverhältnisses. Heutzutage werden für Experimente solcher Art geeignete Videoanalyseprogramme gewählt, mit denen die Auswertung einfacher und schneller zu handhaben ist. Die Messdaten werden anschließend mit den theoretischen Vorhersagen verglichen.

4.5 Abschätzungen zur Wasserrakete²⁶

Für die Mittelstufe empfiehlt es sich die relevanten Größen zur Berechnung des Wasserraketenfluges abzuschätzen, da sie noch nicht die numerische Bestimmung des Fluges durchführen können wie in der zehnten Jahrgangsstufe. Der Betrag der Ausströmgeschwindigkeit des Wassers, Zeitpunkt des „Brennschlusses“ oder die Schubkraft sind leicht zu messende Größen, die die Schüler und Schülerinnen der Mittelstufe bestimmen können.

Die Bernoulli-Gleichung besagt, dass der Gesamtdruck eines abgeschlossenen Systems, der hier aus Betriebsdruck p_{Betrieb} , Staudruck (=dynamischer Druck) p_{dyn} und Schweredruck p_{Schwere} besteht, immer konstant ist:

$$p_{\text{Betrieb}} + p_{\text{dyn}} + p_{\text{Schwere}} = p_{\text{ges}} = \text{konstant}$$

²⁵ *An Educator's Guide with Activities in Science, Mathematics and Technology*; NASA EG-2003-01-108-HQ, 2003

²⁶ Vgl. BRÄUCKER, R.; GÖRLICH, H.; HEISLBETZ, B.: *Forschung zum Anfassen und Erleben*...S. 180

Das ist:

$$p + \frac{1}{2}\rho_W c^2 + \rho_W gh = p_{ges}$$

Wobei ρ_W die Dichte des Wassers, g die Normalfallbeschleunigung und h die Höhe des Wasserstandes ist. Wendet man nun diesen Sachverhalt auf die Wasserrakete an, muss bedacht werden, dass für den Gesamtdruck im Raketenkörper gilt:

$$p_{Luft,innen} + 0 + 0 = p_{ges}$$

Wohingegen der Gesamtdruck an der Flaschenöffnung, an der das Wasser herausschießt folgendermaßen beschrieben wird:

$$p_{Luft,außen} + \frac{1}{2}\rho_W c^2 + \rho_W gh = p_{ges}$$

Setzt man nun die beiden Gleichungen gleich, erhält man Folgendes:

$$p_{Luft,innen} = p_{Luft,außen} + \frac{1}{2}\rho_W c^2 + \rho_W gh$$

Da $\rho_W gh$ vernachlässigbar ist folgt daraus:

$$p_{Luft,innen} - p_{Luft,außen} = \frac{1}{2}\rho_W c^2$$

$p_{Luft,innen} - p_{Luft,außen}$ wird auch der Überdruck Δp_{Luft} genannt.

Das heißt, der Betrag der Ausströmgeschwindigkeit c des Wassers kann folgendermaßen berechnet werden:

$$c = \sqrt{\frac{2\Delta p_{Luft}}{\rho_W}}$$

Bei einem Überdruck von 5 bar ergibt sich für die Ausströmgeschwindigkeit c ein Betrag von $31,6 \frac{m}{s}$. Damit und mit der Vorgabe der Düsenquerschnittsfläche A_D der Wasserrakete lässt sich der Zeitpunkt des Brennschlusses bestimmen. Zuerst wird die Brennrate μ ermittelt, die durch

$$\mu = \rho_W c A_D$$

gegeben ist. Die Brennrate wird als konstant angesehen. Damit ist die Brennschlusszeit T aus dem Verhältnis Wassermasse zu Brennrate:

$$T = \frac{m_T}{\mu}$$

Der Halsdurchmesser einer PET-Flasche ist ca. 21,7 mm groß. Mit 0,3 l Wasser als Treibstoff und einer Düsenquerschnittsfläche A_D wird der Brennschluss nach einer Zeit von etwa 0,028 s erreicht. Mit diesen ermittelten Größen kann dann die Schubkraft berechnet werden:

$$F_S = \mu c \text{ oder } F_S = 2pA_D$$

Der Wert der Schubkraft ist mit den angegebenen Werten $F_S = 370 \text{ N}$.

5 Raketenmodelle

5.1 Streichholzrakete

Aufbau:

Aus Haushaltsalufolie schneidet man ein ca. 8 x 4 cm großen Streifen und faltet ihn ein Mal so, dass man ein Quadrat erhält. Anschließend nimmt man ein Streichholz, das ca. 1 cm gekürzt wird und legt es mit dem Zündkopf mittig auf das Aluminiumquadrat. Nun wird die eine Hälfte der Folie über den Zündkopf geklappt und so fest wie möglich um den oberen Teil des Streichholzes gewickelt.



Abb. 4: Bau einer Streichholzrakete

Das Kürzen des Streichholzes ist notwendig, da die Rakete sonst leicht Übergewicht bekommt und mit dem umwickelten Streichholzkopf nach vorne umkippt. Es hat sich als sehr hilfreich erwiesen eine Art Antriebsdüse in das Aluminium mit Hilfe einer Stecknadel zu formen. Dazu legt man an den Zündkopf die Spitze einer Stecknadel und umwickelt beide mit der Aluminiumfolie. Falls keine Stecknadel zur Hand ist, kann man auch eine aufgebogene Büroklammer verwenden. Anschließend wird die Stecknadel herausgezogen, so dass sich ein kleiner Kanal abzeichnet.

Als Startrampe wird eine Büroklammer verwendet, deren innerer Teil hochgebogen wird. Die Antriebsdüse lässt die heiße Luft, die beim Zünden der Rakete am Streichholzkopf entsteht, besser ausströmen. Dies verhindert, dass die Aluminiumfolie an manchen Stellen aufplatzt und dadurch die Schubkraft nicht kontrolliert genutzt werden kann. Schließlich stellt man die Rakete mit dem Streichholzkopf nach oben auf die Büroklammer, so dass sie zum Start bereit ist.

Man kann alle Materialien inklusive einer Anleitung auch bei astromedia.de bestellen. Unter der Artikelnummer 412.PRK kann man für 2,90 € eine „Pocket Rocket“ erwerben, die zu den obig beschriebenen Materialien aus dem Haushalt jedoch keinen Unterschied erkennen lassen. Zu den

2,90 € können noch 3,50 € Versandkosten kommen, die letztendlich jeden überzeugen werden, auf die kostengünstigeren Werkstoffe, die wahrscheinlich jeder zu Hause hat, zurückzugreifen.

Start:



Abb.5: Startbereite Streichholzrakete

Zum Starten der Rakete hält man ein Feuerzeug unter die Spitze der Rakete. Nach einigen Sekunden hört man ein Zischen und die Rakete schießt mit einer kleinen Rauchfahne durch die Luft. Dabei kann die Rakete Weiten von bis zu 5 m erreichen. Außerdem hinterlässt sie in den meisten Fällen eine kleine Rauchspur und man kann dann für ein paar Sekunden die genaue Flugbahn erkennen.

Funktionsweise:

Durch das Erhitzen der umwickelten Zündholzköpfe werden diese nach einer kurzen Zeit entzündet. Es bildet sich ein Gas, das sich blitzschnell ausdehnt. Jetzt kommt die Antriebsdüse ins Spiel. Sie leitet das Gas in eine vorgegebene Richtung, nämlich nach hinten, heraus. Mit dem gleichen Kraftbetrag, mit dem das Gas herausschießt, wird die Rakete in die entgegengesetzte Richtung gestoßen. Diese sogenannte Schubkraft ist wegen der hohen Ausströmungsgeschwindigkeit des Gases so groß, dass sie das Hölzchen in die Luft katapultiert.

Anmerkungen:

Es ist darauf zu achten, dass die Streichholzrakete nicht auf brennbarem Material startet oder landet. Um die Startunterlage zu schonen, empfiehlt es sich, darauf eine etwa 10 cm x 10 cm große Fläche

Aluminiumfolie aufzukleben. Somit kann die Rakete z.B. vom Lehrerpult oder einem Schülertisch gestartet werden.

Da das Aluminium nach dem Flug sehr heiß ist, sollte man die Rakete, um Verbrennungen zu vermeiden, nur an dem Streichholzende anfassen. Zum Abkühlen darf sie ebenfalls nicht auf einer empfindlichen oder gar brennbaren Unterlage abgelegt werden. Nach dem Zünden der Rakete kommt es zu Verbrennungsgeruch. Darum sollte der Versuch, wenn möglich, am Ende der Unterrichtsstunde und bei geöffneten Fenstern durchgeführt werden.

Falls die Streichholzrakete nicht richtig funktioniert, kann es dafür mehrere Gründe geben. Es kommt oft vor, dass der Raketenkopf bei der Zündung verpufft, ohne dass die Rakete genügend Schub bekommt, um abzuheben. Hier ist in den meisten Fällen die Aluminiumfolie zu dünn und brennt bei zu großer Hitze durch, so dass die heiße Luft nicht durch die Antriebsdüse hinausströmt. Dies kann verhindert werden, indem die handelsübliche Aluminiumfolie doppelt so dick oder indem eine von vornherein stärkere Aluminiumfolie verwendet wird. Für einen reibungslosen Start sollte die Lehrkraft das Raketenmodell vor dem Unterricht auf alle Fälle ausprobieren. Es erfordert einige Übung und möglicherweise mehrere Fehlstarts, bis man zu seiner optimal fliegenden Streichholzrakete gelangt. Als absolut wichtig hat sich bei den zahlreichen Versuchen herausgestellt, dass man nicht auf das Antriebsdüsen verzichten sollte und dass die Aluminiumfolie so dicht wie möglich um das Streichholz gewickelt ist.

Es benötigt Fingerspitzengefühl, um diese Rakete zu bauen. Um sich das Einbauen der Antriebsdüse zu vereinfachen, ist es von großem Vorteil, wenn man statt den normalen runden Streichhölzern auf eine abgeflachte Variante zurückgreift. Die Stecknadel bleibt hierbei viel besser auf dem Streichholz liegen.

Variante 1:

Als besonders erfolgreich erwies sich das Einwickeln eines zusätzlichen Zündkopfes in das Aluminium. Dies verleiht der Rakete eine höhere Schubkraft und lässt sie fast doppelt so weit fliegen als ohne zweiten Zündholzkopf.

Variante 2:

Statt einem Streichholz kann man auch zwei verwenden. Dazu werden die beiden Köpfe der Zündhölzer aneinander gelegt, wobei die Enden voneinander wegzeigen und mit dem Aluminiumstreifen eingepackt. Zum Starten der „doppelten“ Streichholzrakete wird sie wiederum auf eine aufgebogene Büroklammer gestellt. Gezündet wird sie wie die „einfache“ Version, indem das Aluminium erhitzt wird. Das obere Hölzchen wird beim Abrennen der Zündköpfe herausgeschossen und kann bei kor-

rekter Konstruktion eine geringfügig längere Strecke als die einfache Streichholzrakete zurücklegen.

Bewertung:

Abgesehen von der hohen Rate an Fehlstarts eignet sich dieses Raketenmodell hervorragend für den regulären Physikunterricht, da die Durchführung einen sehr geringen Zeitaufwand besitzt und der Effekt der kleinen Rakete groß ist. Es zischt und stinkt. Zudem lässt sich mit einiger Übung die Anzahl der Fehlzündungen verringern.

Außerdem überzeugt dieses Modell durch Schlichtheit und Einfachheit, so dass es sich sehr gut als Schülerexperiment eignet. In der Grundschule jedoch sollte das Experiment nur von der Lehrkraft durchgeführt werden und betont werden, dass beim Nachbau der Rakete immer ein Erwachsener dabei sein sollte. Es ist fraglich, diese Rakete in der Grundschule vorzuführen, da sie sehr einfach nachgebaut werden kann und die Kinder zum Zündeln verleitet werden.

5.2 Filmdöschchenrakete

Aufbau:

Filmdöschchen, in welches etwas Wasser (Höhe ca. 1 cm) gefüllt wird, eine halbe Brausetablette hineingegeben und mit dem Deckel verschlossen wird.



Abb. 6: Materialien für die Filmdöschchenrakete

Start:

Das mit wenig Wasser und einer halben Brausetablette gefüllte Filmdöschen wird kurz geschüttelt und danach auf den Deckel gestellt. Nach einigen Sekunden ertönt ein „PLOPP!“ und das Döschen wird erstaunliche 5 – 10 m in die Luft geschossen.

Funktionsweise:

In dem geschlossenen Behälter löst sich die Brausetablette in dem Wasser sprudelnd auf. Es entsteht hierbei das Gas Kohlendioxid besser bekannt als Kohlensäure. Dabei kommt es zu einem Überdruck, der nach kurzer Zeit so groß ist, dass er ausreicht, um das Filmdöschen von seinem Deckel wegzusprenge.

Anmerkungen:

Die Erfahrung mit den Filmdöschenraketen hat ergeben, dass sich besonders gut helle, fast durchsichtige Dosen eignen, da man hier besser den eingefüllten Wasserstand erkennen kann. Wegen dem Wasser-Brausetabletten-Gemisch, das in einem Gebiet von ca. 30 cm um den Startplatz herum spritzen kann, sollte die Rakete nur im Freien gestartet werden. Außerdem sollte man auch einen gewissen Abstand beim Starten der Rakete einhalten, falls man keine orangen oder gelben Flecken auf seiner Kleidung haben möchte, da fast alle handelsüblichen Brausetabletten das Wasser färben. Um die Rakete noch höher steigen zu lassen, kann statt einer halben Brausetablette eine ganze verwendet werden. Meiner Meinung nach löst aber auch schon eine halbe Tablette eine große Begeisterung bei den Schülern aus. Daher muss jeder selbst entscheiden, ob das an sich schon beeindruckende Experiment, noch gesteigert werden muss, was natürlich auch den Kauf von mehr Brausetabletten mit sich bringt.

Variante:

Man kann die Rakete statt mit Wasser und einer Brausetablette auch mit Essig und Backpulver befüllen. Dazu gibt man einen Esslöffel Essig und einen Teelöffel Backpulver in die Dose und startet die Rakete wie oben beschrieben. Allerdings ist die Dosierung mit den Löffeln ein klein bisschen aufwendiger als einfach nur eine halbe Tablette und ein bisschen Wasser in das Filmdöschen zu füllen.

Erfahrungen mit Kindern aus der fünften Klasse haben ergeben, dass es immer noch einige unter ihnen gibt, die nach Starten der Raketen völlig unerwartet die Döschen auslecken. Dies ist ein weiterer Grund dafür, warum man besser Brausetabletten anstatt Essig und Backpulver benutzen sollte. Das Schlimmste was dabei passieren könnte, dass sie etwas Magnesium oder Calcium zu sich neh-

men, das nach Orange oder Zitrone schmecken wird. Bei Essig und Backpulver werden sie kein besonders leckeres Geschmackserlebnis haben.

Bewertung:

Die Filmdöschenrakete ist ein Paradebeispiel für eine Rakete, die sich optimal für den Physikunterricht eignet. Sie ist weder gefährlich zu starten, was sie zu einem hervorragenden Schülerexperiment macht, noch aufwendig in ihrer Herstellung. Dadurch lässt sich das Experiment schnell und einfach durchführen und kann z.B. sehr gut zu Beginn oder am Ende einer Physikstunde im Pausenhof vorgeführt werden, ohne dass viel Zeit von der Unterrichtsstunde verloren geht.

Die Materialkosten sind ebenfalls niedrig, da nur Brausetabletten gekauft werden müssen. Filmdöschen erhält man ausreichend und kostenlos in jedem Fotogeschäft, wobei sich hier die Frage stellt, wie lange dies noch in Zeiten der Digitalfotografie der Fall ist. Sobald man jedoch die Döschen bekommen hat, kann man sie immer wieder verwenden und muss sich daher nicht ständig um Nachschub kümmern. Leider leeren sie im Laufe der Zeit aus, so dass sie früher bei geringerem Druck starten und so nicht sehr hoch fliegen.

Neben ihrer finanziellen Vorzüge und dem simplen Aufbau, besticht diese Rakete noch dazu mit ihrer beeindruckenden Wirkung. Von einer kleinen Filmdose und einer gewöhnlichen Brausetablette erwartet im ersten Moment wahrscheinlich niemand etwas Spektakuläres. Sobald die Rakete aber stattliche 5 – 10 m in die Luft geschossen ist und das noch dazu mit einem lustigen „PLOPP!“, ist jeder Raketenstarter und –beobachter schnell begeistert. Das Schönste an diesem Versuch ist die Tatsache, dass er wirklich immer gelingt und so das Erfolgserlebnis der Schüler und Schülerinnen, und auch des Lehrers, garantiert ist.

An dieser Stelle möchte ich den Leser auf das Kapitel 6 „Raketenstation am Girls’ Day“ aufmerksam machen. Die Filmdöschenrakete war einer der vorgeführten Raketen, die bei den teilnehmenden Mädchen die größte Begeisterung auslöste. In besagtem Kapitel wird die Reaktion der Schülerinnen noch näher erläutert.

5.3 Luftballonrakete

Aufbau:

Zunächst wird auf einen ca. 8 m langen Perlonfaden ein Strohhalme mit dickem Durchmesser aufgefädelt und anschließend der Faden gut gespannt aufgehängt. Man pustet nun einen Luftballon auf

und verschließt sein offenes Ende, indem dieses umgeklappt und mit einer Wäscheklammer fixiert wird, sodass keine Luft aus dem Ballon entweichen kann. Die verschlossene Luftballonrakete wird dann mit Hilfe von Klebeband an dem Strohhalm befestigt und ist zum Starten bereit.

Start:

Zum Starten zwickt man die Wäscheklammer, die den Luftballon geschlossen hält, auf und die Rakete saust den Perlonfaden entlang. Sie kommt dann, abhängig von der Steigung und der Menge an Luft im Ballon, nach ca. 8 m zum stehen.

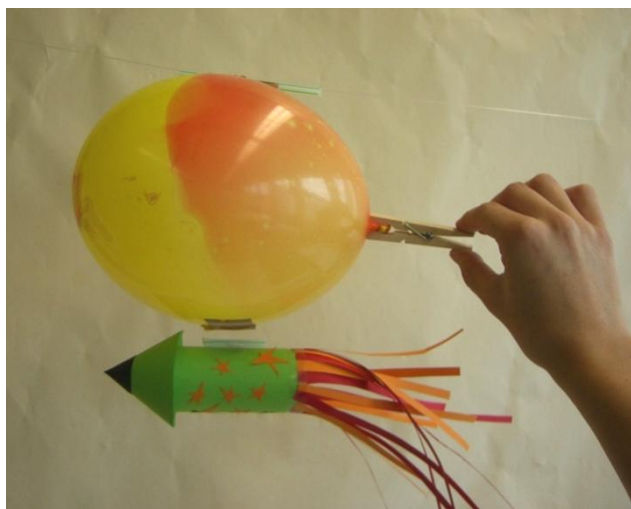


Abb. 7: Starten einer Luftballonrakete

Funktionsweise:

Die Funktionsweise der Rakete ist mit dem Rückstoßprinzip zu erklären. Eine nach hinten ausströmende Masse, in diesem Fall Luft, bewirkt eine Gegenkraft. Die sogenannte Schubkraft, die die Rakete nach vorne stößt, ist gleich der Kraft, die die Luft aus dem Ballon herausdrückt. Da sich der Ballon aufgrund seiner Elastizität rasch in seine ursprüngliche Form zurückzieht, wird die Luft nach dem Start schnell herausgepresst. Da die Ausströmmasse nicht sehr groß ist, ist hier vor allem die hohe Ausströmgeschwindigkeit für die Schubkraft verantwortlich.

Anmerkungen:

Es ist darauf zu achten, dass der Luftballon gut am Strohhalm befestigt ist, da er sich sonst während des Fluges lösen kann. Am besten eignet sich hierfür Paketklebeband.

Verschönert wird die Rakete, indem man einen möglichst bunten Ballon wählt, der durch seine optische Erscheinung die Schüler und Schülerinnen besonders anspricht. Außerdem kann man eine

Raketenattrappe aus einer Toilettenpapierrolle und etwas Pappe basteln und das Ganze an den Luftballon hängen. Bunt bemalt kommt es gerade bei den jüngeren Schülern und Schülerinnen gut an.

Mit dieser Raketenattrappe löst sich auch das Problem, dass sich der Luftballon oft während des Fliegens um den gespannten Faden dreht und sich dabei vom Strohalm löst. Sobald man etwas Gewicht an den Ballon hängt, fliegt er stabil an der Schnur entlang ohne zu schlingern.

Um sich das Geld für den Kauf der Strohhalme zu sparen, muss man nur in das nächste Schnellrestaurant gehen. Wenn man dort an der Kasse freundlich nach ein paar Trinkhalmen fragt, werden einem meistens problemlos ein paar zur Verfügung gestellt.

Für einen gelungenen Überraschungseffekt sorgt man, indem man die Perlonschnur von der Tafel- seite bis in den hinteren Teil des Klassenraumes spannt, bevor die Schüler und Schülerinnen in den Unterricht kommen. Da die Perlonschnur fast unsichtbar ist, wird sie von den meisten unbemerkt bleiben. Zur gegebenen Zeit, möglichst zu Beginn der Stunde, lässt man die Luftballonrakete starten. Dabei saust sie über die Köpfe der Schüler und Schülerinnen hinweg und hinterlässt höchstwahrscheinlich einen bedeutenden Eindruck.

Je nachdem, welches Thema der Raketenphysik in der Unterrichtsstunde untersucht werden soll, kann die Rakete natürlich auch an einem senkrecht gespannten oder waagrecht gespannten Perlonschnur entlang fliegen. Für die Schubkraftbestimmung lässt man die Rakete senkrecht starten und misst die Höhe, die sie erreicht hat. Anhand von Masse der Rakete, Kenntnis über die Erdbeschleunigung g und die erreichte Höhe kann man die Schubkraft berechnen. Wenn man die Rakete dagegen waagrecht fliegen lässt, kann man mit Hilfe von einer Lichtschranke z.B. die Endgeschwindigkeit der Rakete über eine kleine Strecke bestimmen. Hier ist noch einmal darauf hinzuweisen, dass die Geschwindigkeitsbestimmung auf großen Strecken zu ungenau ist, da es sich um eine beschleunigte Bewegung mit nicht konstanter Beschleunigung handelt.

Um das Rückstoßprinzip an Raketen so einfach wie möglich darzustellen, gibt es die Möglichkeit, die Rakete in abgewandelter Form zu benutzen. Hierzu lässt man ganz einfach einen aufgepusteten Luftballon los, der nicht an einer Schnur befestigt ist. Er wird unkontrolliert durch den Raum fliegen und eignet sich hervorragend als Einstieg in eine Unterrichtsstunde, die sich mit Raketen bzw. dem Rückstoßprinzip beschäftigen wird. Um nun die Flugbahn des Luftballons zu kontrollieren, befestigt man ihn, wie beschrieben, an eine Schnur. Somit erhält man einen linearen Flug.

Variante 1:

Mit einer Abwandlung der beschriebenen Luftballonrakete besteht die Möglichkeit, den Schülern und Schülerinnen das Prinzip einer zweistufig angetriebenen Rakete näher zu bringen.

Dazu wird um den ersten aufgeblasenen Luftballon ein Ring aus Pappkarton geschoben, der den Ballon etwas einquetscht. Pustet man nun einen zweiten Luftballon auf und schiebt seine Öffnung zwischen den Ring und den ersten Ballon, kann aus ihm keine Luft entweichen. Erst nach dem Start, wenn der erste Luftballon an Volumen verliert und der Ring diesen nicht mehr fest umschließt, kann aus dem zweiten Ballon die Luft ausströmen. Dies verleiht diesem einen zusätzlichen Schub.



Abb. 8: Zweistufige Luftballonrakete

Variante 2:

Ein Luftballon lässt sich außerdem hervorragend als Antrieb für ein Luftballonauto verwenden, dass entweder selbst gebastelt werden kann (Anleitung siehe 10.4) oder im Spielzeugladen erworben werden kann. Die Modelle aus dem Spielzeughandel sind meist kleine Plastikautos, an die ein Luftballon befestigt werden kann. Von der Firma OPITEC gibt es einen Bausatz für ein Luftballonauto mit der Artikelbezeichnung „LT-Raketenfahrzeug 104966“ für 3,49 € zuzüglich Versand, das eine geschätzte Bauzeit von zwei Stunden besitzt.



Abb. 9: Luftballonauto der Firma OPITEC

Bewertung:

Die Luftballonrakete lässt sich, wie bereits erwähnt, sehr gut für Experimente zur Schubkraft oder zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Rakete verwenden. Gleiches kann man aber auch mit Raketen durchführen, die mit einem Raketentreibsatz funktionieren, der beim Zünden Funken sprüht und zischt. Dadurch sind solche Raketen vielleicht beeindruckender als die Luftballonrakete, aber auch gleichzeitig gefährlicher und daher eher als Lehrerexperiment zu empfehlen.

Für die Behandlung von zwei- oder mehrstufigen Raketen im Unterricht sollte die Variante mit zwei Luftballons unbedingt besprochen werden. Den Schülern und Schülerinnen wird auf einfachste Weise das Prinzip von großen Raumfahrttraketen aufgezeigt. Dies lässt erkennen, dass hinter der komplexen Technik von Weltraumfahren einfache Grundlagen stecken, die für jeden begreifbar sind. Die Vorführung der zweistufigen Luftballonrakete ist jedoch erfahrungsgemäß oft erfolglos, da zum einen die Startvorbereitungen sich sehr kompliziert gestalten und zum anderen die „Zündung“ der zweiten Stufe während dem Flug nicht gut zu erkennen ist. Die Ballons entleeren sich so schnell, dass es nicht ersichtlich ist, wann der zweite beginnt, die Luft heraus zu lassen. Es scheint so, als würde gleichzeitig die Luft aus beiden entweichen.

Die einfache Luftballonrakete eignet sich besonders gut als Schülerexperiment, da gerade Grundschul Kinder gerne basteln und ihre Raketen verzieren. Beim Anbringen des Modells an der Schnur sollte der Lehrer oder die Lehrerin behilflich sein, denn man muss den Luftballon vorsichtig am Strohalm befestigen, da er sich sonst sofort wieder löst. Auch das Verschließen des Ballons mit einer Wäscheklammer hat sich als knifflig erwiesen. Es erfordert eine gewisse Fingerfertigkeit oder die Hilfe eines anderen, um den Ballon luftdicht zu bekommen. Dadurch, dass die Rakete ohne entzündlichen Treibsatz auskommt, eignet sie sich vor allem für jüngere Kinder. Ältere lassen sich erfahrungsgemäß schwer mit einem simplen Luftballon an einer Schnur begeistern.

Neben ihrer Ungefährlichkeit besitzt die Rakete noch weitere Vorteile. Sie ist kostengünstig, die Materialien sind in jedem Bastelgeschäft zu erhalten und sind so oft wie gewünscht wieder verwendbar.

Auch diese Rakete wurde am Girls' Day gezeigt und hat eher wenig Begeisterung bei den Mädchen ausgelöst. Vermutliche Gründe werden im Kapitel 6 näher erläutert.

5.4 Wasser – und Luftrakete

Aufbau:

Die Wasserrakete kann entweder bei einer Lehrmittelfirma erworben werden oder man baut sie ganz einfach selbst. Das in Abbildung 10 gezeigte Modell ist von der Lehrmittelfirma PHYWE und kostet um die 78,00 €. Sie besitzt eine Schubkraft von 0,3 N und kann etwa 20 m hoch fliegen. Außerdem verfügt diese Modellrakete über zwei Ringe an den Finnen, so dass man sie an einer Schnur mit Kohlendioxidpatronen fliegen lassen kann. Im Preis inbegriffen ist eine Abschussrampe, ein Erdspieß, eine Spezialpumpe, ein Fülltrichter für Wasser sowie eine Halterung für Kohlendioxidpatronen.²⁷



Abb. 10: Wasserrakete von PHYWE²⁸

Um eine Wasserrakete selbst anzufertigen, benötigt man eine Plastikflasche mit einem Volumen von 1 l. Man kann auch mit kleineren Flaschenvolumina arbeiten, jedoch besteht hier der Nachteil darin, dass im Vergleich zu größeren Flaschen nur ein geringer Druck aufgebaut werden kann und die Rakete weniger weit fliegt als ihre größeren Kollegen.

Vereinfacht beschrieben muss die Flasche mit einem Ventil versehen werden, das man anschließend mit einer Fahrradpumpe leicht verbinden kann. Zur genaueren Bauweise dieser Konstruktion gibt es im Internet zahlreiche Anleitungen. Die meisten empfehlen mit einem durchbohrten Gummistopfen zu arbeiten, in den das Fahrradventil gesteckt wird und mit dieser Konstruktion anschließend der Flaschenhals luftdicht abgeschlossen wird.²⁹ Das Ventil wird aus einem ausgedienten Fahrradschlauch ausgeschnitten und muss nicht neu gekauft werden. Andere Konstruktionspläne beschrei-

²⁷ Vgl. PHYWE-Systemkatalog Physik: *Inklusive Preisliste, Physik-Basisgeräte*, 2009, S. 205

²⁸ http://expvorl.physik.uni-muenchen.de/versuche_mechanik/kinematik_dynamik/index.html

²⁹ Vgl. http://spiele.j-crew.de/wiki/Bauanleitung_Wasserrakete
oder <http://www.physikfuerkids.de/wiewas/wrakete/bau.html>

ben, den Deckel der PET-Flasche zu durchbohren und dort das Ventil einzuführen. In jedem Fall muss der Verschluss mit dem Ventil so konstruiert sein, dass keine Luft aus der Rakete entweichen kann! In Kapitel 7 wird mit Wasserraketen gearbeitet, in deren Deckeln ein Gardenaschlauchende befestigt ist und die zum Starten auf eine Startrampe gesteckt werden, an der das Gegenstück des Gardenaschlauches angebracht ist.³⁰ Die genaue Bauweise und der Start von diesen Modellen werden in Kapitel 7 beschrieben.

Um den Flug der Wasserrakete zu stabilisieren und sie optisch eleganter erscheinen zu lassen, kann man Seitenflügel aus Photokarton oder Bastelpappe an dem Raketenkörper befestigen. Dazu schneidet man ein Trapez mit einer Höhe von ca. 9 cm aus dem Karton, faltet es in der Mitte und schneidet an der längeren Seite des Trapezes ca. 1 cm an der Faltlinie entlang ein. Von der geteilten, längeren Seite des Trapezes knickt man nun die zwei Seitenteile 1 cm ein und erhält somit Flächen, die am Raketenkörper angeklebt werden. Nach Belieben, verwendet man drei oder vier Finnen, wobei die Stabilität bereits ab dreien gegeben ist. Es ist darauf zu achten, dass die Flügel jeweils den gleichen Abstand zu einander besitzen, d.h. bei dreien, müssen sie 120° auseinander liegen, bei vier 90°.



Abb. 11: Beispiel einer selbstgebauten Wasserrakete

Außerdem empfiehlt es sich, als Spitze des Geschosses einen halbierten Tennisball zu verwenden, da so beim Aufschlag auf die Erde die Rakete abgefedert wird. Zwecks aerodynamischer Eigenschaften wäre zwar eine Spitze besser, jedoch kann man auf diese Weise die Lebensdauer des selbstgebauten Modells verlängern. Der aufgeschnittene Tennisball wird einfach mit Heißkleber auf

³⁰ Vgl. <http://space175.unibe.ch/fileadmin/media/pdf/pet-rakete.pdf>
oder http://www.harald-sattler.de/html/body_wasserrakete.htm

den Boden der Plastikflasche, also dem oberen Teil der Rakete, befestigt. Natürlich sind der Phantasie des Raketenkonstruktors keine Grenzen gesetzt und das selbstgebaute Modell kann ganz nach dem jeweiligen Geschmack durch Bemalen oder Bekleben noch weiter verziert werden.

Start:

Für den Start eignet sich besonders gut eine Rampe, die verhindert, dass die Rakete Übergewicht bekommt und kurz nach dem Start Richtung Boden zielt. Das Geschoss kann aber auch aus der Hand gestartet werden. Dies ist aber weniger zu empfehlen, da man sich genau in der Schussbahn des ausströmenden Wasserstrahls befindet und aus diesem Grund sehr nass werden kann. Wer also auf eine unfreiwillige Dusche verzichten möchte, befestigt seine Rakete besser an einer Rampe, die passend zum Raketenmodell bestellt werden kann. An der Rampe befindet sich das Gegenstück des Fahrradventils, woran die Rakete befestigt wird. Mit einer Luftpumpe wird nun durch Pumpen ein Druck im Raketenkörper aufgebaut, bis dieser groß genug ist, das Modell losschießen zu lassen.



Abb. 12: Startvorbereitung

Dies kann entweder mit einer luftgefüllten oder mit einer zum Teil mit Wasser gefüllten Rakete durchgeführt werden. Wobei die wassergefüllte viel weiter fliegen wird als die luftgefüllte. Der Grund dafür wurde im Kapitel 3 und 4 erläutert.

Zuerst lässt man sie nur mit Luft gefüllt fliegen, anschließend wiederholt man das Experiment, wobei die Rakete mit etwas Wasser gefüllt wird. In die zunächst luftgefüllte Rakete pumpt man mit etwa drei Hieben weiter Luft, sodass der Druck in ihr erhöht wird. Um nun die Rakete zu starten,

muss man das verschlossene Ventil öffnen, indem man kräftig an der Reißleine, die an der Rampe vorhanden ist, zieht.

Nun befüllt man die Rakete mit etwas Wasser und lässt sie auf die gleiche Weise starten. Sofort lässt sich erkennen, dass die Wasserrakete deutlich weiter fliegt als die Lufrakete. Um den Effekt zu verdeutlichen, verwendet man für den nächsten Flug noch mehr Wasser als Ausströmungsmasse und man wird abermals eine längere Flugstrecke der Rakete feststellen. Dies lässt vermuten: je mehr Wasser, desto weiter fliegt das Modell. Jedoch ist ab einer gewissen Menge Wasser der Punkt erreicht, an dem die Rakete so schwer wird, dass ihr Startgewicht höhere und weitere Flüge verhindert. Es kommt also genau auf die passende Wassermenge an, da bei wenig ausströmender Masse, die Schubkraft klein ist und die Rakete keine Weite von bis zu 50 m schaffen wird. Erfahrungsmäßig ist das Optimum der Wassermenge bei einer Füllung von etwa $\frac{1}{3}$ der Plastikflasche gegeben.

Funktionsweise:

Besonders an diesem Modell lässt sich sehr schön das Rückstoßprinzip beobachten, da die ausströmende Masse deutlich zu erkennen ist. Die Luft bzw. das Wasser wird nach hinten herausgeschossen und die Rakete erfährt eine Schubkraft nach vorne. Vor dem Start wird mit Hilfe einer Luftpumpe ein hoher Druck in der Flasche aufgebaut. Dieser drückt nach anschließendem Öffnen des Ventils den „Treibstoff“ mit großer Geschwindigkeit heraus. Da die Schubkraft von der Masse und der Ausströmungsgeschwindigkeit des Wassers während der Schubdauer abhängig ist, bewirkt ein hoher Druck in der Flasche eine hohe Ausströmungsgeschwindigkeit und diese wiederum eine große Schubkraft.

Anmerkungen:

Die Antwort auf die Frage, wie viel Wasser und Druck für einen optimalen Flug benötigt wird, sollten die Schüler und Schülerinnen selbstständig herausfinden. Die Wasserrakete regt zum Tüfteln an, wobei Form, Gewicht und Treibstoffmenge variiert werden sollten, um die jeweiligen Abhängigkeiten zu entdecken.

Der Druck, der in der Flasche aufgebaut werden kann, ist nach oben begrenzt, da er abhängig von der Kraft des Raketenstarters ist, der die Luftpumpe bedient. Es ist anzumerken, dass man mit einer simplen Fahrrad- oder Fussballpumpe keinen Druck erreichen kann, der die PET-Flasche zum Platzen bringt, jedoch dies mit einem Kompressor möglich ist. Davon ist abzuraten, wenn es sich um ein von Schülern und Schülerinnen beobachtetes oder durchgeführtes Experiment handelt.

Natürlich kann die Rakete auch zur einfachen Veranschaulichung des Rückstoßprinzips von der Lehrkraft vorgeführt werden und erfordert dafür keine aufwendige Bastelei, da sie wie bereits erwähnt auch als fertiges Modell zur Verfügung steht.

Selbstredend sollte das Modell nur im Freien gestartet werden, um Wasserpfützen in Räumen zu vermeiden und um ausreichenden Platz für den Flug zu bieten. Wie bei jedem Geschoss gilt: Nicht auf Menschen zielen und darauf achten, dass sich keine Personen auf dem Fluggelände befinden, da der Zusammenstoß mit einer Rakete, selbst wenn es nur eine Plastikfalsche ist, schmerzhaft sein kann.

Bewertung:

Besonders für die Veranschaulichung der Abhängigkeit der Schubkraft von der Ausströmungsmasse eignet sich dieses Modell hervorragend. Es ist eine deutliche Auswirkung auf die Flughöhe sowie auf die Flugweite zu beobachten, wenn man die Wassermenge in der Rakete variiert.

Gekaufte Modelle von Lehrmittelfirmen funktionieren immer und können ohne großen Zeitaufwand in der Schule vorgeführt werden. Selbstgebaute hingegen benötigen oftmals mehrere Startversuche und Verbesserungsmaßnahmen am Modell, um das erwünschte Ergebnis zu erreichen, belohnen dafür aber jeden „Raketeningenieur“ mit einem beeindruckenden Flug, falls der Abschuss erfolgreich war.

Gerade unter den bastelfreudigen Schülern und Schülerinnen von Grundschulen kommt dieses Raketenmodell erfahrungsgemäß sehr gut an. Im Kapitel 7 wird ein Projekt mit Grundschulkindern vorgestellt, in dem sie in Zweier- oder Dreiergruppen an jeweils einer Wasserrakete gebaut haben. Es kamen dabei die unterschiedlichsten Modelle zustande, mit deren Konstruktion die Kinder viel Spaß hatten. Anschließend durfte jede Gruppe ihre Rakete starten lassen und auch hier kannte die Begeisterung der Schüler und Schülerinnen keine Grenzen.

Weitere Details über diesen Projekttag, der an der Universität Würzburg stattfand, kann man im erwähnten Kapitel nachlesen.

Beispiele für Wasserraketen:

<i>Preis (ohne Versandkosten)</i>	<i>Vertrieb</i>	<i>Name</i>
14,50 €	www.proidee.de	Wasserrakete
29,90 €	www.allesfliegt.com , www.modell-raketen.de ,	Rockyman Wasserrakete

	www.woti.de, OPITEC	
39,90 €	www.allesfliegt.com	Shootinger H ₂ O Rakete
36,95 € 39,95 €	www.woti.de www.modell-raketen.de	Super Shootinger Wasserraketenset
78,00 €	PHYWE	Raketenmodell

5.5 CO₂-Rakete

Aufbau:

Die CO₂-Rakete besteht im Wesentlichen aus einer Kohlendioxidpatrone, die nach belieben entweder an einem Raketenmodell als Treibsatz verwendet werden kann oder ohne großen Aufwand selbst als „Rakete“ funktioniert. Dazu wird die Kapsel mit einem nicht zu dünnen Draht umwickelt, der als Halterung dient und an einen Perlonfaden gehängt werden kann. Wichtig ist hierbei, dass die Spitze der Kohlendioxidpatrone von sich kreuzenden Drähten gut festgehalten wird, da die gesamte Kapsel sonst beim Zünden nach vorne aus der Halterung herausschießt.

Als Treibsatz kann man die Patrone sehr gut an einem Wasserraketenmodell der Lehrmittelfirma PHYWE benutzen. Zum besagten Modell gibt es passende Halterungen für CO₂-Patronen, die hinten in die Wasserrakete gesteckt werden können. Die Rakete wird dann mit Hilfe von Ringen, die an einer Finne angebracht sind an einen Faden gehängt.



Abb. 13: Raketenmodell mit CO₂-Patrone als Antrieb

Der Faden muss in beiden Fällen sehr lang sein, da die Patronen eine ordentliche Schubkraft bewirken. Es hat sich herausgestellt, dass die Kapseln eine Rakete mindestens 8 m an einer Schnur entlang stoßen können und am Ende der Strecke das Kohlendioxid noch einige Sekunden weiter ausgeströmt wird. Abschätzungen zu Folge kann die Patrone eine Wegstrecke von ca. 20 m bewältigen. Selbstverständlich kann der Perlonfaden auch senkrecht aufgehängt werden, wobei sich hier das Problem ergibt, dass die Rakete nicht ordentlich geführt werden kann und sie dadurch um den Faden herum schlingert anstatt geradlinig nach oben zu schießen.

Start:

Die Düse einer Kohlendioxidpatrone ist mit Aluminium verschlossen, das man mit Hilfe einer Nadel und einigen Hammerschlägen aufstechen kann. Sobald diese Schicht durchstoßen ist, strömt das Gas aus und die Kapsel schießt nach vorne.

Funktionsweise:

Genau wie bei den anderen Raketen basiert der Antrieb dieses Modells auf dem Rückstoßprinzip. Das Gas strömt nach Aufstechen der Patrone nach hinten aus und verleiht damit dem Geschoss eine Schubkraft, die es nach vorne sausen lässt. Das Kohlendioxid ist unter hohem Druck in der Kapsel eingeschlossen und entweicht daher mit einer hohen Ausströmgeschwindigkeit. Außerdem ist die Öffnung der Antriebsdüse nur so groß wie der Durchmesser einer Nadel und verleiht dem Gas dadurch eine noch höhere Ausströmgeschwindigkeit.

Varianten:

Die Kohlendioxidkapsel kann als Antrieb verschiedenster Modelle verwendet werden. Zum Beispiel kann sie auch an einem Wagen befestigt werden und man erhält damit ein Raketenauto. Da die Patrone eine große Schubkraft besitzt, sollte man den Wagen entweder auf einer Schiene entlang fahren lassen oder er sollte schwer genug sein, da sonst der Wagen nicht linear fährt, sondern von seinem Antrieb in beliebige Richtungen gestoßen werden kann. Selbstverständlich lässt sich die Kapsel auch auf einem Boot anbringen.

Anmerkungen:

Da die Rakete an einem Faden hängt, wird ihr eine geradlinige Flugbahn vorgeschrieben. Würde man sie hingegen auf dem Boden starten lassen oder aus der Hand heraus, würde sie unkontrolliert durch den Raum schießen. Diese Tatsache ist äußerst gefährlich, da die Patrone sehr klein aber massiv und relativ schwer ist und als Geschoss z.B. Glasscheiben zertrümmern oder Menschen

ernsthaft verletzen kann. Daher muss man sich vor jedem Start vergewissern, dass die Halterung fest in der Rakete und die Kohlendioxidkapsel sicher in der Halterung stecken. Leider ließ sich feststellen, dass die Halterung der PHYWE-Wasserrakete nicht sehr fest in dem Modell sitzt und so ist es passiert, dass diese samt der Patrone am Ende der Flugstrecke aus der gestoppten Rakete heraus fiel und quer über den Boden schoss. Dabei ist die Kapsel noch so schnell, dass ein Ausweichen fast unmöglich ist und es sich hierbei um einen eher gefährlichen Versuch handelt. Es ist also unbedingt notwendig darauf zu achten, dass die Patrone sich nicht von der Rakete lösen kann.

Auch die Variante in der die Kohlendioxidkapsel mit Draht umwickelt ist stellte sich als riskantes Experiment heraus. Der Draht ist meistens nicht perfekt an der Patrone oder dem Faden angebracht, so dass er sich während dem Flug aufgrund der großen Kraft des Geschosses entweder von diesem oder von der gespannten Schnur löst. Auch in diesem Fall schießt die Patrone anschließend unkontrolliert über den Boden.

Die Kapsel kühlt sich beim Entleeren schlagartig ab, was zwar ein interessanter Nebeneffekt ist und dessen Entstehung man mit den Schülern und Schülerinnen besprechen sollte, dennoch sollte man vermeiden, die Patrone direkt nach Beendigung ihres Fluges mit bloßen Händen anzufassen, da diese kleben bleiben kann. Damit sie sich wieder löst muss man jedoch nur ein paar Sekunden Geduld haben. Sobald sie sich der Zimmertemperatur angleicht, bekommt man sie von den Fingern wieder los. Trotzdem kann es für manche Kinder erschreckend sein und es ist möglich, dass sie sich in ihrer Panik die Patrone dann von den Fingern reißen.

Eine weitere Gefahr besteht, wenn die Rakete nicht reibungslos am Faden entlang gleitet. Es reicht nur eine geringe Abbremsung aus, um die Rakete um die Schnur herum schlingern zu lassen. Sie kann dabei Menschen oder Gegenstände, die sich in der Nähe des Perlonfadens befinden, treffen. Es ist also darauf zu achten, dass sich nichts und niemand in näherer Umgebung der Flugstrecke während der Versuchsdauer befindet.

Bewertung:

Da sich erwiesen hat, dass der Gebrauch von Kohlendioxidkapseln als Antrieb von Raketen nicht ungefährlich sein kann, ist dieses Experiment nicht für junge Kinder geeignet. Entweder man weist die Schüler und Schülerinnen auf die möglichen Gefahren sehr deutlich hin, die sich ergeben können, falls die Patrone sich löst und chaotisch durch die Luft schießt, oder der Versuch wird nur vom Lehrer oder der Lehrerin vorgeführt, obwohl selbst dabei nicht alle Sicherheitsmängel ausgeschlossen werden können.

Geht man allerdings verantwortungsbewusst mit den Kapseln um, wird man mit diesen Geschossen eindrucksvolle Reichweiten der Modelle erleben. Während des Fluges der Rakete hört man ein rela-

tiv lautes Zischen, das entsteht, wenn sich die Kohlendioxidkapsel entleert. Dieser Effekt wird die Schüler und Schülerinnen nicht unbeeindruckt lassen.

Die CO₂-Rakete ist auf alle Fälle ein Modell mit sehr starkem Antrieb. Zudem trumpft sie mit ihren vielfältigen Einsatzmöglichkeiten. Wird das Modell mit angebrachtem Verantwortungsgefühl gestartet, steht dem spannenden Experiment nichts im Wege und es kann durchaus vorkommen, dass es den Beobachtern aufgrund der großen Wirkung der kleinen Patrone für einen kurzen Moment die Sprache verschlägt.

5.6 Raketenschiffchen mit Spiritus

Aufbau:

Aus einem ca. 2 mm dicken Stück Styropor schneidet man ein ca. 3 cm langes und ca. 1,5 cm breites stromlinienförmiges Schiffchen aus (siehe Abb. 14).³¹ Das Styropor lässt sich am besten mit Hilfe eines Drahtes schneiden, der an einem Spannungsgerät angeschlossen ist. Legt man eine Spannung, je nach Drahtdicke sind das ca. 5 V, an den Draht an, erhitzt sich dieser und schneidet das Styropor wie Butter. Dabei werden die Kanten des Schiffchens glatt versiegelt und fransen nicht aus, so wie es der Fall ist, wenn man einen Cutter benutzt. Der Umgang mit dem heißen Draht erfordert eine gewisse Geschicklichkeit, da er das Styropor wirklich schnell schneidet und man mit zitterigen Händen deshalb leicht krumme Schnittkanten bekommt. Auch das Loch kann man mit dem Draht ausschneiden, es klappt aber genauso gut mit einem erhitzten Nagel.

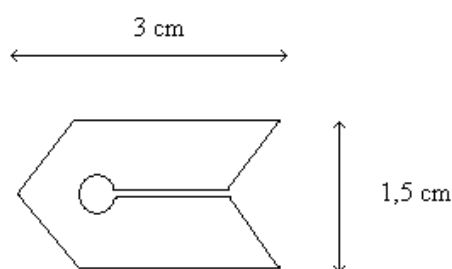


Abb. 14: Skizze für das Raketenschiffchen³²

Start:

Das Schiffchen wird nun in einen Bottich mit Wasser gelegt. Mit einem dünnen Strohhalm oder einer Pipette nimmt man ein kleines bisschen Spiritus auf und gibt vorsichtig einen Tropfen in das Loch im Raketenschiffchen (siehe Abb. 15). Das Schiffchen düst mit erstaunlicher Geschwindigkeit

³¹ Vgl. *Physikalische Freihandexperimente Band 1 – Mechanik*, Aulis Verlag Deubner 1998, S. 33

³² Vgl. *Physikalische Freihandexperimente...*, S. 33

mehrere Sekunden lang über die Wasseroberfläche. Es kommt erst zum Stehen, wenn der gesamte Treibstoff ausgeströmt ist.

Funktionsweise:

Alkohol hat eine geringere Dichte als Wasser und schwimmt daher auf dessen Oberfläche. Gibt man nun einen Tropfen auf das Wasser breitet sich dieser sehr schnell zu einer monokularen Schicht aus. Das Loch in dem Schiffchen ist nur an der Seite, an dem sich der Kanal befindet, offen. Es bietet dem Spiritus nicht genügend Fläche sich auszubreiten, der daraufhin aus dem Kanal ausströmt. Dies verleiht dem Schiffchen eine Schubkraft nach vorne.

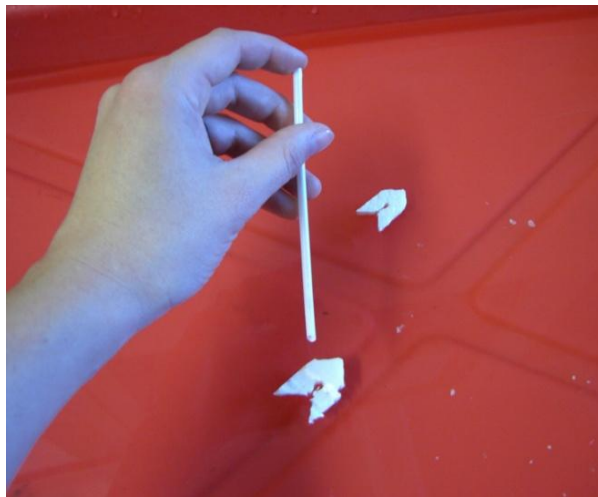


Abb. 15: Start eines Raketenschiffchens

Anmerkungen:

Das Raketenschiffchen lässt sich beliebig oft verwenden. Da sich Wasser und Alkohol mischen lassen, kann es nach einigen Starts jedoch dazu kommen, dass der Alkoholanteil im Wasser zu hoch ist, so dass das Schiffchen nicht wie gewohnt losdüst, wenn man den Spiritus in das Loch tropfen lässt. Das Problem lässt sich ganz einfach lösen, indem man das Wasser austauscht.

Eine weitere Problematik ergibt sich, wenn man nicht genau mit dem Spiritus auf das Loch des Bötchens zielt. Tropft man daneben, wird das Wasserfahrzeug von der Auftreffstelle bloß ein bisschen abgelenkt, es schießt aber nicht so rasant vorwärts, wie wenn das Loch genau getroffen wird.

In der Anleitung des Buches *Physikalische Freihandexperimente Band 1 – Mechanik* des Aulis Verlag Deubner wird das Schiffchen mit den Maßen 2 cm Länge und 1 cm Breite angegeben. Es stellte sich jedoch heraus, dass diese Boote so klein waren, dass es großes handwerkliches Geschick verlangte, in ihnen die Löcher für den Treibsatz zu bohren und bereits das Ausschneiden der Schiffchen sehr umständlich war. Außerdem war es deutlich schwerer, die Löcher mit dem Tropfen Spiri-

tus zu treffen. Die Länge von 3 cm und die Breite von 1,5 cm vereinfachen den Umgang mit dem Raketenmodell.

Erfahrungsgemäß findet man kein 2 mm dickes Styropor mehr in handelsüblichen Bastelgeschäften oder Baumärkten, da laut Aussage der Geschäftsleitungen Styroporplatten dieser Dicke während dem Transport zu schnell brechen und sie sich danach nicht mehr verkaufen lassen. Abhilfe kann Moosgummi verschaffen, der ebenso wie Styropor auf Wasser schwimmt und sich mit einem Cutter leicht bearbeiten lässt. Oder aber man benutzt wieder den erhitzten Draht und schneidet sich das dickere Styropor, welches es in Baumärkten zu kaufen gibt, auf gewünschte Maße zurecht.

Wie die meisten Raketenmodelle erfordert auch dieses eine gewisse Übung. Bevor man das perfekt symmetrische Schiffchen gebastelt hat, wird man zuerst einige krumme Exemplare erhalten, die dann in kleinen Kreisen über die Wasseroberfläche fahren. Diese sind aber nicht weniger nett anzusehen, als ihre korrekt ausgeschnittenen Kollegen. Damit die Schiffchen eine gerade Bahn beschreiben, müssen sie vollkommen symmetrisch sein, da sonst der Spiritus auch nicht geradlinig ausströmt.

Man sollte eine große Wanne mit Wasser zur Vorführung der Raketenschiffchen wählen, damit diese nach ihrem Start nicht sofort an den Rand stoßen. Sie müssen jedoch nicht besonders tief sein. Statt Alkohol kann man als „Treibstoff“ auch herkömmliches Spülmittel benutzen. Dies setzt jedoch bei Berührung des Wassers dessen Oberflächenspannung im gesamten Behälter herab. Ein zweites Mal könnte man das Spülmittel deshalb nicht mehr verwenden, da es sich nicht mehr so stark ausbreiten würde wie beim ersten Mal.³³

Bewertung:

Obwohl es eines der kleinsten Modelle ist, überzeugt das Raketenschiffchen durch seine große Wirkung. Gerade einmal ein Tropfen Spiritus reicht aus und das Schiffchen düst einige Sekunden lang über die Wasseroberfläche. Außerdem ist das Experiment zu empfehlen, weil es meistens auf Antrieb funktioniert, was es für den Schulunterricht dadurch sehr attraktiv macht. Falls man die Schiffchen bereits vorbereitet hat, ist es ein sehr zeitsparender Versuch, der höchstens ein paar wenige Minuten zum Vorführen dauert.

Es ist zudem auch als Schülerexperiment durchführbar, wobei man als Lehrer oder Lehrerin beim Schneiden des Styropors aufpassen muss, dass sich die Schüler und Schülerinnen nicht am Draht verbrennen. Überdies ist es sehr wichtig, die Jugendlichen darauf hinzuweisen, niemals vom Spiritus zu trinken und ihn fern von Feuerquellen zu halten, da er leicht entzündbar ist.

³³ Vgl. *Physikalische Freihandexperimente...*, S. 35

5.7 Ethanol-Rakete³⁴

Aufbau:

Der Raketenkörper besteht aus einer Plastikflasche mit einem Volumen von 330 ml. Man schließt die Flasche mit einem durchbohrten Korken oder passenden Gummistopfen. Das andere Ende des Korkens wird dann in ein etwa 30 cm langes Wasserrohr mit einem Durchmesser von 2 cm gesteckt. Das Rohr befestigt man mit verstellbaren Klemmen an einem Stativ. Der Winkel zwischen Wasserrohr und Boden sollte ca. 45° betragen.

Durch die Röhre führt man nun zwei gut isolierte dicke Kabel, die durch die Bohrung im Korken etwa 3 cm in das Fläschchen hinein ragen und als „Zündkerzen“ dienen. Die Bohrung wird anschließend mit etwas Knete um die Kabel herum abgedichtet. Das Spiritus-Dampfgemisch, das als Treibstoff verwendet wird, darf nicht aus der Flasche entweichen können.

Die Kabelenden werden jeweils mit den beiden Polen einer Influenzmaschine verbunden. Diese wird deshalb verwendet, weil sie ohne Anschluss an das Stromnetz funktioniert und deswegen sehr gut im Freien einsetzbar ist.



Abb. 16: Detail der „Zündkerze“

Start:

In die Plastikflasche werden nun einige Kubikzentimeter Spiritus gegeben. Anschließend schüttelt man das gut verschlossene Fläschchen, so dass sich der Alkohol in dem Flaschenkörper verteilt und die Innenwände mit ihm benetzt sind. Den überschüssigen Spiritus schüttet man wieder in seinen Aufbewahrungsbehälter zurück. Die Flasche muss nun gut mit dem Korken, in dem die Kabelenden

³⁴ Vgl. WILKE, H.-J.: *Überraschende Experimente mit Kunststoffflaschen* – In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 52, 1999, Nr. 4, S. 239-240

stecken, verschlossen werden. Dann steckt man diese Konstruktion in das Wasserrohr, das als Startrampe dient.

Man vergewissere sich, dass die Influenzmaschine eine genügend hohe Spannung erzeugt. Dies ist der Fall, wenn zwischen den Ladungskugeln des Apparates, die sich in einem Abstand von ca. 1 cm voneinander befinden, ein Funke überschlägt. Nun werden die Stromkabel mit der Influenzmaschine verbunden. Nach ein paar Sekunden Kurbeln wird die Rakete mit einem lauten Knall etwa 5 - 10 m weit aus dem Wasserrohr geschossen.



Abb. 17: Startbereite Ethanol-Rakete

Funktionsweise:

Der Spiritusdampf im Raketenkörper wird durch den Überschlag an den Kabelenden, die in der Flasche stecken, entzündet und es erhöht sich schlagartig der Druck im Fläschchen. Dieser Druck reicht aus, um dieses vom Korken wegzuschießen.

Anmerkungen:

Besonders schön ist dieses Experiment zu beobachten, wenn es im Dunkeln durchgeführt wird. Hierbei lässt sich sehr gut die Explosion im Inneren der Plastikflasche erkennen, wenn der Alkoholdampf entflammt wird. Falls die Rakete Startschwierigkeiten aufweist, kann es möglicherweise daran liegen, dass der Flaschenkörper zu kalt ist und sich der Treibstoff nicht entzündet. Zur Lösung des Problems muss man das Fläschchen mit den Händen etwas erwärmen.

Bewertung:

Bei diesem Experiment ist sowohl der laute Knall, der ertönt, wenn die Rakete abgeschossen wird, als auch ihre unerwartete Weite, die sie zurücklegen kann, beeindruckend. Außerdem muss man für

einen reibungslosen Durchgang kaum etwas beachten. Es sollte die Spannung hoch genug sein und der Flaschenkörper nicht zu kalt. Ansonsten steht dem erfolgreichen Abschuss der Rakete nichts im Weg. Das heißt, dass dieses Experiment gerade für die Schule sehr gut geeignet ist, da das Erfolgserlebnis nicht ausbleiben wird.

Den Rückstoß als Antrieb einer Rakete ist eher schwierig mit diesem Modell zu demonstrieren, da es den Beobachtern nicht unbedingt klar werden kann, was nun nach hinten geschleudert wird, damit die Rakete nach vorne gestoßen wird. Der Antrieb wird eher dem Druck, der in der Flasche entsteht zugeschrieben werden. Um jedoch den Rückstoß näher ins Bild zu rücken, kann man den Schülern und Schülerinnen nach Abflug des Geschosses das Rohr zeigen, in das sich der Korken mehrere Zentimeter hineingebohrt hat. Der Stopfen wäre ohne Rückstoßprinzip nicht in das Rohr gestoßen worden.

Die Materialien dieses Experimentes lassen sich in jedem Baumarkt und Supermarkt finden und sind sehr kostengünstig. Außerdem kann der Flaschenkörper mehrere Male abgeschossen werden, da die Explosion nicht ausreicht, das Fläschchen zu verformen.

Für den Einsatz in der Schule sollte man unbedingt auf Flaschen mit größerem Volumen verzichten! In ihnen kann mit ausreichender Menge Treibstoff eine Explosion stattfinden, die den Flaschenkörper zerbersten lässt. Die Schüler und Schülerinnen sollte man auf die Gefahren, die dies mit sich bringt, aufmerksam machen.

5.8 Modellrakete mit Treibsatz

Aufbau:

Es gibt zahlreiche Firmen, die Bausätze mit verschiedenen Schwierigkeitsgraden in ihrer Ausführung anbieten. Eine Übersicht ist am Ende des Teilkapitels zu finden.

Für den Bau einer Modellrakete, die mit festem Treibsatz gezündet wird benötigt man folgende Materialien:

Ein Papprohr für den Raketenkörper mit einer Länge von 10 bis 50 cm. Der Durchmesser ist von der Größe des Motors abhängig, für die Schule sollte ein Durchmesser von 4 cm ausreichend sein.

Die Raketenspitze kann entweder aus Holz oder Plastik bestehen. Das Holz muss für den Raketenkörper passend geraspelt, gefeilt und geschmiegelt werden. Eine Plastikspitze ist in den meisten Bausätzen von vornherein dabei, man kann aber auch übriggebliebene Sylvesterraketenspitzen verwenden, welches dem Ganzen eine persönliche Note verleiht. Wenn die Rakete über ein Bergungssystem verfügt, muss bei der Anpassung der Spitze an das Papprohr darauf geachtet werden, dass

sie sich leichtgänglich von diesem trennen lässt. Dies lässt sich am besten feststellen, wenn man die aufgesteckte Spitze durch ein kräftiges Blasen in das Raketenrohr aus diesem heraus drücken kann. Außerdem muss die Raketenspitze an einem hitzebeständigen Kevlarfaden mit anschließendem Gummi befestigt sein. Ohne den Gummi würde die weg gesprengte Spitze vom Kevlarfaden abreißen. Dies würde eine mühsame Suche nach der Raketenspitze mit sich bringen.

Für die Finnen der Modellrakete kann man Holz, Balsa, Sperrholz, Pappe oder Plastik verwenden. Sie werden entweder mit Kraftkleber oder Holzleim am unteren Teil des Raketenkörpers befestigt. Die Flossen müssen im jeweils gleich großen Abstand zu einander stehen, damit die Stabilität der Rakete nicht gefährdet wird.

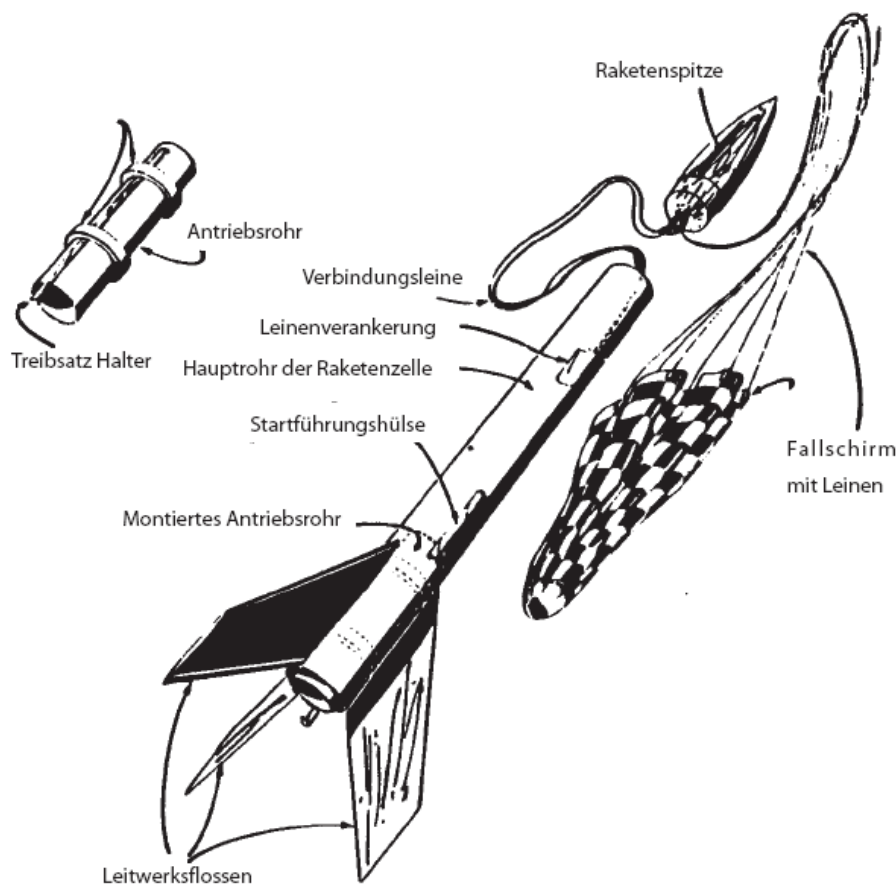


Abb. 18: Typischer Aufbau einer Modellrakete

Der Motor der Rakete ist aus mehreren Schichten aufgebaut (siehe Abb. 19).

Die Treibladung (3) erzeugt den Schub für die Rakete und die langsam brennende Verzögerungsladung (4) hinterlässt eine Rauchspur. Die Brenndauer der Verzögerungsladung gibt die Länge des antriebslosen Flugs an. Das Bergungssystem wird durch die Ausstoßladung (5) heraus gesprengt. Die Hülle (2) des Raketenmotors ist aus Pappe. Sie ist oben und unten jeweils mit Tonpfropfen (6)

verschlossen. Durch den Düsenkanal (1), der durch die Unterseite führt, wird der Zünder eingeführt.³⁵

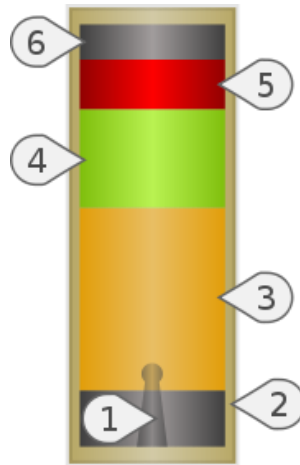


Abb. 19: Treibsatzschema

Der Treibsatz befindet sich in einem kleinen Rohr, das fest im Raketenkörper eingebaut ist. Dieses ermöglicht ein leichtes Wechseln der Raketenmotore. Zwei Metallzungen halten den Antrieb jeweils oben und unten. Ohne die obere würde der Motor aufgrund des Rückstoßes der Treibladung in das Raketenrohr hineingeschoben werden. Da die Ausstoßladung das Bergungssystem nach oben wegdrückt, muss der Motor zusätzlich noch von einer unteren Metallzunge gehalten werden, da dieser sonst aus der Rakete von der Ausstoßladung heraus gesprengt werden würde und nicht das Bergungssystem. Ohne Bergungssystem würde die Rakete unkontrolliert zu Boden stürzen und könnte großen Schaden anrichten.

Die handelsüblichen Treibsätze, die es nur im Internet oder bei Versandhäusern zu bestellen gibt, sind mit einer speziellen Kennzeichnung beschriftet. Sie geben die Stärke des Motors sowie die Brenndauer der Verzögerungsladung an.

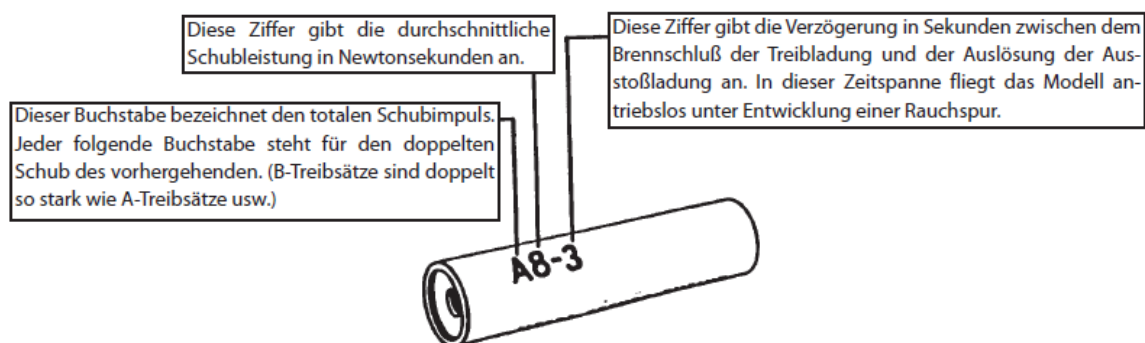


Abb. 20: Erklärung der Motorenbenennung

³⁵ Vgl. www.modell-raketen.de

Für jedes Modell wird bei Bestellung ein passender Motor angeboten. Je nach Geschmack, kann man jedoch zwischen verschiedenen starken Antrieben wählen. Die Größe des Motors ist durch den Durchmesser des jeweiligen Raketenrohrs und den rechtlichen Bestimmungen begrenzt.

In den Bausätzen ist immer ein kleines Plastikröhrchen, welches als Startführungshülse dient, enthalten. Es wird mit Supergleber mittig und parallel zum Raketenrohr befestigt. Durch dieses Röhrchen wird der Leitstab, der an der Startrampe befestigt ist, durchgesteckt. Der Leitstab ist für die Anfangsführung der Rakete beim Start und steht senkrecht in Richtung Himmel. Ohne diese Halterung könnte die Rakete beim Abschuss umkippen und zu einem äußerst gefährlichen Geschoss werden. Falls das Röhrchen einmal fehlen sollte oder man die Modellrakete ohne Bausatz konstruiert, lässt sich genauso gut ein zugeschnittener Trinkhalm verwenden.

Es gibt drei Varianten von Bergungssystemen bei Modellraketen. Entweder das Modell ist so leicht und klein, dass keines benötigt wird, oder man verwendet Strömerbänder oder einen Fallschirm. Die Bänder bestehen aus bunter Plastikfolie, die auch in weiter Entfernung noch gut zu erkennen ist. Sie sind im Raketenrohr mit reißfesten Fäden angebracht, werden ebenfalls von der Ausstoßladung herausgesprengt und bremsen die Rakete während ihrem Fall auf die Erde.

Der Fallschirm wird genau wie die Strömerbänder auch aus Plastikfolie gebastelt und mit Hilfe von Tesafilm mit Nähgarn verbunden. Das Nähgarn ist in dem Raketenrohr befestigt. Der Durchmesser des Fallschirms ist im Normalfall zwischen 20 cm und 50 cm groß. Er sollte nicht zu groß gewählt werden, da sonst die Rakete zu langsam zur Erde zurückschwebt und dabei schnell vom Wind abgetrieben werden kann. Dabei kann man sie leicht aus den Augen verlieren und muss mit längerer Suche nach dem Modell rechnen.

Auch hier ist es wichtig, dass das Bergungssystem locker im Raketenkörper sitzt, um problemlos ausgestoßen werden zu können. Als Schutz vor Verbrennen des Bergungssystems wird zwischen diesem und dem Treibsatz hitzefeste Schutzwatte, Schutzpapier oder ein rechteckiges feuerfestes Tuch, ein sogenanntes Nomextuch, gesteckt.



Abb. 21: Selbstgebaute Modellraketen

Nun ist die Modellrakete fast fertig. Es fehlt nur noch ihre äußere Verschönerung natürlich ganz nach Geschmack des Raketenbauers. Dafür eignet sich besonders gut Lack, den es in jedem Modellbaugeschäft zu kaufen gibt, und Aufkleber zur Verzierung.

Start:

Aus bereits erwähnten Sicherheitsgründen sollte man zum Starten unbedingt eine Startrampe benutzen. Sie ist eine einfache Konstruktion aus einer hitzebeständigen Platte mit einem Durchmesser von 20 cm bis 30 cm. Dies kann z.B. eine Holzplatte mit aufgenagelter Metallplatte sein. Die Metallplatte alleine wäre zu instabil für den Leitstab, welcher durch die Mitte etwas außerhalb der Rakete durch die Platten gesteckt wird. Der Leitstab ist ebenfalls aus Metall und ca. 80 cm lang mit einem Durchmesser von 3 mm.



Abb. 22: Startbereite Modellrakete auf Startrampe mit Leitstab

Die Rakete muss für einen sicheren Flug möglichst senkrecht gestartet werden, wobei auch der Wind einkalkuliert werden sollte. Dazu biegt man den ganzen Stab ein wenig gegen die Windrichtung. Achtung: Schon wenige Grade genügen! Ohnehin sollte die Rakete nur bei nahezu Windstille gestartet werden, da sich sonst ihre Flugrichtung nicht ausreichend abschätzen lässt.

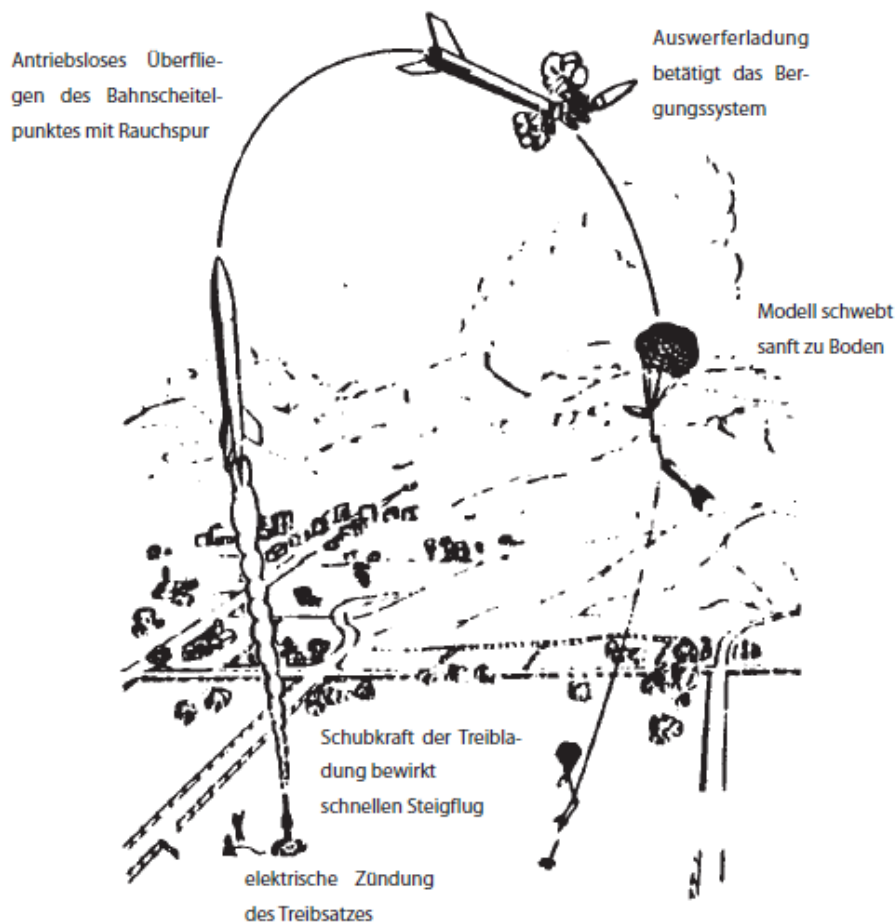
Gezündet wird die Modellrakete im einfachsten Fall mit einer Zündschnur, die lange genug brennt, um sich in einen sicheren Abstand zum Geschoss zu begeben. Die Lunte ist entweder beim Rake-

tenmotor dabei oder kann in einem Fachhandel erworben werden. Eine andere Möglichkeit ist, die Rakete elektrisch mit einem Elektrozünder zu starten. Er besteht aus zwei dünnen Drähten, die mit Pech ummantelt sind, die glühen, sobald eine Spannung von mindestens 6 V angelegt wird. Die benötigte Spannung bekommt man aus vier 1,5 V Batterien oder Akkus. Die Akkus funktionieren oft besser, da sie mehr Strom liefern und dadurch die Spannung nicht so oft zusammenbricht, wie es bei den Batterien der Fall ist. Die Länge des Zündkabels sollte aus Sicherheitsgründen wenigstens 3 m betragen. Es wird mit Krokodilklemmen am Elektrozünder befestigt. Zum Starten verbindet man das Kabel mit den Akkus oder baut sich ein schickes Akkuhaltergerät mit Tastschalter (siehe Abb. 23), um die Rakete per Knopfdruck zu zünden. Wichtig hierbei ist, den Knopf lange gedrückt zu halten, da es 2-3 Sekunden benötigt, bis es zur Zündung kommt.



Abb. 23: Selbstgebautes Startgerät mit Lautsprecher für das Warnsignal (Design by Michael Kamprad)

Die Flughöhe ist von Leistung des Motors und Gewicht des Modells abhängig. In Deutschland sind 800 m die erlaubte Maximalhöhe. Kurz nach Erreichen des höchsten Punktes wird dann die Spitze abgeschossen und die Rakete schwebt im Idealfall langsam zur Erde zurück. Falls das Modell Flug und Landung unbeschadet überstanden hat, kann man es sofort wieder mit einem neuen Treibsatz ein weiteres Mal starten lassen.

Funktionsweise:Abb. 24: Typischer Flug einer Modellrakete³⁶

Der im Modell befindliche Raketenmotor wird wie beschrieben gezündet. Zuerst verbrennt die Treibladung, die durch den Düsenkanal nach hinten ausgestoßen wird. Dies verleiht dem Geschoss seine Schubkraft, die es nach oben katapultiert. Nach einer gewissen Zeit, die durch die Verzögerungsladung vorgegeben ist, wird die Ausstoßladung entfacht. Falls das Modell über ein Bergungssystem verfügt, kommt dieses nun zum Einsatz. Es wurde zusammen mit der Raketenspitze aus dem Raketenkörper herausgesprengt und sorgt dafür, dass die Rakete wohlbehalten zur Erde zurück taumelt.

Anmerkungen:

Bei jedem Start solch einer Rakete müssen unbedingt die rechtlichen Einschränkungen eingehalten werden! Außerdem ist es äußerst wichtig, dass das Bergungssystem funktioniert, da die Rakete sonst im ungebremsten Fall zu einem Geschoss wird und eine Gefahr für den Menschen darstellt,

³⁶ <http://datal.opitec.de/img/downloads/technikdownloads/Sonstige/9-10-Jahre/105386bd.pdf>

aber auch Schäden an z.B. in der Nähe parkenden Autos verursachen kann. Vor dem Start sollte man daher unbedingt überprüfen, ob sich die Spitze leichtgängig aus dem Raketenrohr entfernen lässt.

Die Metallhalterung für den Motor kann nach Abschuss der Rakete heiß sein! Daher muss man vorsichtig mit dem geborgenen Modell umgehen.

Um einen kontrollierten Flug zu garantieren, sollte es möglichst windstill sein und die Rakete senkrecht gestartet werden. Aus der Erfahrung lässt sich außerdem feststellen, dass man die Modelle zu einer Zeit im Jahr starten lassen sollte, in der die Felder entweder schon gemäht oder noch nicht sehr hoch gewachsen sind. Raketen, die in einem Feld mit hohem Getreide gelandet sind, lassen sich nur sehr schwer wieder finden.

Falls sich das Modell selbst nach langem Drücken des Startknopfes nicht starten lässt, ist in den meisten Fällen die Zündspannung nicht ausreichend hoch. Vor dem Start muss man sich vergewissern, ob die Akkus geladen sind und die Verbindung zum Elektrozünder nicht unterbrochen ist.

Die günstigsten Bausätze für Modellraketen können im Internet komplett mit vier Treibsätzen und Elektrozündern bereits ab 24,95 € bestellt werden. Es hat sich herausgestellt, dass manche Anleitungen auf Englisch verfasst sind, z.B. das Modell „Quark“ von woti.de. Dies könnte zu Verständnisschwierigkeiten bei jüngeren Schülern und Schülerinnen führen.

Bewertung:

Modellraketen sind in jeder Hinsicht eine Faszination, ob für den Beobachter oder für den Konstrukteur. Sie steigen mit einem lauten Zischen zu beachtlichen Höhen auf und ziehen einen Feuerschweif hinter sich her. Jeder, der solch einen Start aus nächster Nähe beobachten darf, wird in höchstem Maße beeindruckt sein.

Da bei den Starts und auch beim Aufbau dieser Raketen so gut wie keine Gefahren bestehen, eignen sich diese Objekte hervorragend als Schülerexperiment. Wichtig ist natürlich auch hier, die Schüler und Schülerinnen auf den sorgsamen Umgang mit dem Treibsatz hinzuweisen. Außerdem dürfen die Modellraketen nicht ohne erwachsene Aufsicht gestartet werden.

Je nach Größe und Aufwand des Bausatzes dauert der Bau eines solchen Modells ein oder mehrere Tage. Es gibt Bausätze, in denen die Raketen einfach nur zusammengesteckt werden müssen und solche, in denen geschmirgelt und geklebt werden muss, bis die einzelnen Teile passgenau sitzen. Falls am Ende die Rakete mit Lack verschönert wird, muss damit gerechnet werden, dass es einen Tag dauern kann, bis die Farbe getrocknet ist. In jedem Fall kann jedoch eine Modellrakete relativ schnell angefertigt werden.

Außerdem sind sie nicht sehr teuer. Bausätze für mittelgroße Modellraketen, die sich am besten für Schülerprojekte eignen, kosten zwischen 24,95 € und 39,90 €. Da an jedem Modell wenigstens zwei Schüler oder Schülerinnen arbeiten können, verringert sich der Preis pro Kopf. Zahlreiche Raketenmodelle und Startersets für Einsteiger findet man z.B. auf den Internetseiten der Firmen woti.de, allesfliegt.com und modell-raketen.de. Einige Raketenmodelle und Bausätze werden in den unteren Listen aufgeführt, die sich aufgrund ihres günstigen Preises und ihrer einfachen Bauweise besonders gut für die Schule eignen. Es ist zu beachten, dass die Fertigmodelle ohne Zubehör wie z.B. Raketenmotore und Startrampe geliefert werden und an ihnen nur wenig gebastelt werden muss, oft müssen sie nur zusammengesteckt werden. Hingegen können die unten genannten Bausätze als komplette Sets mit sämtlichem Zubehör erworben werden.

Um ein Schülerprojekt auszufüllen, das über einen längeren Zeitraum verläuft, kann man den Schülern und Schülerinnen auftragen, sich näher mit der Physik und der Theorie des Raketenfluges zu beschäftigen. Zum Abschluss des Projektes könnte die Gruppe Kurzreferate über Themen wie „Schubkraft“, „Raketenantriebe“ und Ähnliches halten und das Ganze mit einem Raketenstart krönen. Für den Lehrer oder die Lehrerin ist ein solches Projekt ohne großen Aufwand durchzuführen, da die Jugendlichen sehr gut selbstständig arbeiten können. Die Bausätze sind für jeden einfach zu verstehen und der Start einer Modellrakete funktioniert so gut wie immer. Auch die Theorie ist nicht kompliziert und kann von den Schülern und Schülerinnen eigenständig erarbeitet werden.

Der Bau einer Rakete als Schülerprojekt sollte auf jeden Fall ausprobiert werden, da er eine Bereicherung für den Schulalltag bedeutet!

Beispiele für Raketenbausätze und Fertigmodelle (Flughöhe abhängig vom verwendeten Raketenmotor):

<i>Preis</i>	<i>Vertrieb</i>	<i>Name</i>
2,85 €	OPITEC	Rakete Nummer II
3,85 €	OPITEC	Rakete Nummer I
5,99 €	www.woti.de	Quark (Estes)
6,49 €	www.woti.de	Swift (Estes)
13,90 €	www.woti.de	Alpha 1 (Estes)

14,95 €	www.rocket-onlineshop.de	Avalear
15,39 €	www.modell-raketen.de	Puma Modellrakete (Estes)
17,95 €	www.rocket-onlineshop.de	D-Nelson Tomahawk
24,95 €	www.woti.de	Taser Starterset (Estes)
25,99 €	OPITEC	Rakete Video Courier (mit Nutzlastkammer)
29,29 €	www.modell-raketen.de	Taser Modellrakete Starter Set (Estes)
39,90 €	www.modell-raketen.de	Riptide Modellrakete Starter Set (Estes)
39,90 €	www.allesfliegt.com	Ruthless Starterset
47,90 €	www.woti.de	Astra 3 Super Starterset
34,90 €	www.modell-raketen.de	

6 Raketenstation am Girls' Day



Abb. 25: Plakat der Raketenstation am Girls' Day

6.1 Organisatorisches

Der Girls' Day fand dieses Jahr am 23. April in ganz Deutschland statt. Dieser Projekttag ermöglicht Mädchen sich in männerdominierten Berufsfeldern Einblick zu verschaffen und soll bei ihnen Interesse für frauenuntypische Arbeitsgebiete wecken. Darunter fallen auch die Bereiche der Naturwissenschaften.

Die Physikdidaktik der Universität veranstaltete an diesem Tag unter Leitung von Frau Spanheimer für insgesamt 24 Mädchen unterschiedlicher Altersgruppen ein Schülerlabor und eine „Versuchsrallye“ mit neun Stationen. Bei jeder hatten die Schülerinnen, die in Vierergruppen eingeteilt waren, jeweils eine Viertelstunde Zeit zu experimentieren. Unter den Stationen befand sich auch eine, an der die Schülerinnen vier verschiedene Raketenmodelle vorgeführt bekamen und selbst bauen durften. Diese Station wurde im Rahmen dieser Arbeit erstellt und betreut.

An jeder Station bekamen die Mädchen Karten mit Fragen bezüglich der dort durchgeführten Versuche. An der Raketenstation sollten sie aufschreiben, welche Raketenmodelle sie kennengelernt haben und welche Materialien verwendet wurden. Die Fragen wurden zuvor von Frau Spanheimer entwickelt und dienten den Mädchen als Gedächtnisstütze, was sie an diesem Tag alles erlebt haben. Die verwendeten Raketenmodelle waren die Luftballonrakete, die Streichholzrakete, die Film-döschenrakete und die Wasserrakete.

6.2 Reaktionen zu den Raketenmodellen

6.2.1 Luftballonrakete

Sobald die Mädchen an der Raketenstation eintrafen, wurde die Luftballonrakete gestartet, die an einem etwa 5 m langen Perlonfaden über ihre Köpfe hinweg sauste. Der fast unsichtbare Faden fiel keiner einzigen Gruppe vorher auf und die Rakete wurde ohne Vorwarnung gestartet, womit die Schülerinnen überrascht werden sollten. Diese Reaktion blieb jedoch aus. Lediglich die Mädchen der fünften Jahrgangsstufe zeigten ein wenig Interesse an diesem Modell. Im Vergleich zu den Raketen, die im Anschluss gezeigt oder gebastelt wurden, erregte die Luftballonrakete kaum Aufmerksamkeit. Es lässt sich nur vermuten, dass das Modell nicht sehr eindrucksvoll ist, weil es sich um einen simplen Luftballon handelt, der nichts als Luft nach hinten ausstößt und nicht knallt oder raucht. Es könnte jedoch sein, dass das Modell bei jüngeren Schülern und Schülerinnen der Grundschule vielleicht besser ankommt, vor allem wenn sie es selber basteln und starten lassen dürfen.

6.2.2. Streichholzrakete

Nach der Luftballonrakete bauten die Schülerinnen Streichholzraketen und durften sie eine nach der anderen abfeuern.



Abb. 26: Schülerinnen mit ihren Betreuern beim Streichholzraketenbasteln

Die Mädchen stellten sich sehr geschickt beim Anfertigen der Rakete an und somit flog fast jedes Geschoss einige Meter weit. Darüber war der größte Teil der Schülerinnen sehr erfreut und wollten auch gleich noch weitere Streichholzraketen bauen, dies war jedoch aufgrund von Zeitmangel nicht möglich. Diese Reaktion zeigte, dass ihnen dieses Modell sehr gut gefallen haben muss. Viele der Mädchen waren zu Beginn etwas unsicher mit dem Zünden der Rakete, da sie Angst hatten, dass die

Geschosse womöglich explodieren könnten oder sie sich beim Start erschrecken könnten. Als dann aber die Mutigeren unter ihnen ihre Raketen abfeuerten und nichts Schlimmes dabei passierte, trauten sich auch die Ängstlichsten ihre Modelle zu starten. Gerade diese Mädchen konnten nach erfolgreichem Abschuss ihre Begeisterung nicht unterdrücken und jubelten auf, als die Zündhölzer durch die Luft flogen.

Viele der Mädchen hatten lange Haare, die ihnen beim Entzünden ihrer Streichholzrakete vors Gesicht fielen und dabei oft gefährlich nahe an die Flamme des Feuerzeuges kamen. Man muss unbedingt darauf achten, dass die Haare nach hinten gehalten oder gebunden werden. Die Mädchen sind sich der Gefahr oftmals nicht bewusst, weil sie viel zu beschäftigt sind, die Rakete zu starten.

6.2.3 Filmdöschchenrakete



Abb. 27: Vorbereitungen zum Start der Filmdöschchenraketen

Für den Start unserer Filmdöschchen gingen alle nach draußen vor das Universitätsgebäude. Die Mädchen bekamen noch kurze Einweisungen für den Start und stellten sich in einem Halbkreis auf. Nachdem alle bereit waren, starteten sie die Raketen wie in Kapitel 5.2 beschrieben. Wie erwartet war die Reaktion auf dieses Modell sehr positiv. Die Schülerinnen strahlten und freuten sich, dass das kleine Döschen so hoch flog und wollten auch diese Rakete noch ein paar Male starten lassen. Nicht so sehr begeistert waren sie von der Tatsache, dass die Filmdöschchen nach Abschuss wegen der aufgelösten Brausetablette schmierig waren und ihre Finger dadurch klebrig wurden, als sie die Döschchen wieder einsammelten. Unter den Schülerinnen der fünften Jahrgangsstufe gab es einige, die anschließend nicht nur ihre Hände ableckten, sondern auch die Filmdosen. Da in diesen jedoch nur ein paar Reste von Magnesium übrig geblieben waren, musste man sich keine Sorgen machen,

dass das Ausschlecken auf irgendeine Weise für die Kinder schädlich sein könnte. Dennoch war dieses Handeln für mich völlig unerwartet. Es zeigt einem deutlich, dass es sich eben doch noch um jüngere Kinder handelt, als man meinen möchte. Spätestens bei diesem Modell war das Eis gebrochen und selbst die ganz coolen Mädchen der siebten und achten Jahrgangsstufe konnten ihre Begeisterung nicht länger verheimlichen.

6.2.4 Wasserrakete



Abb. 28: Schülerinnen beim Abschuss einer Wasserrakete

Die Wasserrakete wurde direkt im Anschluss an die Filmdöschenrakete ebenfalls im Freien gestartet. Dazu meldeten sich jeweils zwei Mädchen freiwillig. Die eine pumpte mit all ihrer Kraft Luft in das mit etwas Wasser gefüllte Modell, die andere zog anschließend an der Reißleine, die das Ventil der Wasserrakete öffnete. Die Schülerinnen erreichten mit der verwendeten Rakete bis zu 50 m und der Flug wurde mit lautem Kreischen kommentiert. Besonders lustig fanden die Mädchen, dass beim Abschuss des Modells das Wasser nach hinten herausgeschossen kam und meistens den Betreuer traf, der die Startrampe festhielt. Die Startrampe musste deswegen festgehalten werden, da die Rakete nicht vom Boden aus gestartet wurde, sondern von einer kleinen Mauer aus und das Geschoss dadurch noch weiter geflogen ist. Die benutzte Wasserrakete war von der Lehrmittelfirma PHYWE und funktionierte bei jedem Start einwandfrei. Anfänglich hatten alle Mädchen großen Respekt vor dem Geschoss und viele trauten sich auch bei diesem Modell nicht, es zu starten. Sie beobachteten mit großen Augen, wie Druck im Raketenkörper aufgebaut wurde und wichen ängstlich ein paar Schritte zurück. Beim Start zuckten alle von ihnen ziemlich zusammen. Jedoch

nach ein paar Schrecksekunden jubelten sie der abgeschossenen Rakete hinterher und meldeten sich sofort für den nächsten Abflug.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass dieses Modell neben der Filmdöschchenrakete am besten bei den Schülerinnen ankam. Die ersten beiden Raketen beeindruckten sie nicht so stark, wie die letzten beiden. Das Interesse an Raketenmodellen wurde bei ihnen garantiert geweckt.

Als Lehrer oder Lehrerin sollte man daher auf Wasser- und Filmdosenrakete bei der Behandlung von Raketenmodellen keinesfalls verzichten. Sie können ohne großen Aufwand vorgeführt werden und sind wohl die eindrucksvollsten Modelle, die von den Kindern ohne Probleme zu Hause nachgebaut werden können.

Die **Seiten 69 bis 73** wurden aus datenschutzrechtlichen Gründen **entfernt**, da sie Fotos von Grundschulern enthielten, für die keine Genehmigung zur Veröffentlichung im Internet vorliegt. Wir bitten um Verständnis. Die vollständige Arbeit kann bei Herrn Dr. Wilhelm eingesehen werden.

8 Zusammenfassung

Dass der Einsatz von Raketenmodellen in der Schule lohnenswert und sinnvoll ist, wurde in dieser Arbeit aufgezeigt. Wer auf diese großartigen Experimentierobjekte verzichtet, wird die Begeisterung der Schüler und Schülerinnen für explosive Raketenstarts nie kennenlernen. Dies wäre schade und auch wenig verständlich, denn Raketen gehören zu den Versuchen, die sehr wenig Aufwand für ihre Durchführung benötigen und gleichzeitig beeindruckende Effekte mit sich bringen.

Im ersten Kapitel wurde die Verwendung der Raketen mit der Veranschaulichung passender Themengebiete begründet, die in den unterschiedlichen Schularten behandelt werden. Es zeigte sich hierbei, dass sich zahlreiche Gelegenheiten ergeben, den Schulunterricht durch den Start einer Rakete zu bereichern. Vor allem zur Besprechung des dritten Newtonschen Axioms bietet sich der Lehrkraft eine Fülle von Möglichkeiten, Experimente mit Raketenmodellen mit den Schülern und Schülerinnen auszuprobieren. Da von den allermeisten Versuchen keine Gefahr ausgeht, können sie von den Kindern selbstständig durchgeführt werden.

Des Weiteren wurden relevante Gleichungen und Prinzipien zu Raketenflügen in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellt, die sich mit der Theorie der Raketenphysik beschäftigten. Es stellte sich heraus, dass hinter den eindrucksvollen Raketenstarts keine komplexen Sachverhalte stecken, sondern leicht verständliche Regeln der Mechanik. Um die einzelnen Komponenten der Raketengleichung schülergerecht zu besprechen, wurden einige Experimente vorgestellt, die meiner Meinung nach unverzichtbar zur Behandlung von Systemen veränderlicher Masse sind. Die Vorschläge für Schülerexperimente zur Messung von Raketenflugbahnen der DLR sind ebenfalls in diesem Kapitel vorgestellt. Sie unterstreichen die Ansicht, dass das Experimentieren mit Raketen ohne Weiteres den Schülern und Schülerinnen überlassen werden kann.

Unter den in Kapitel 5 vorgestellten Raketenmodellen befindet sich nur eines, welches als Schülerexperiment weniger zu empfehlen ist. Die CO₂-Rakete ist aufgrund ihrer Gefährlichkeit, wenn sie sich vom leitenden Faden löst, nur mit äußerster Vorsicht zu starten. Alle anderen Modelle überzeugen durch ihre einfache Handhabung und bieten sich hervorragend für den Schuleinsatz an. Es ist außerdem zu betonen, dass fast alle Modelle aus Haushaltsgegenständen gebaut werden können und daher den Geldbeutel nicht unnötig belasten.

In den beiden letzten Kapiteln der vorliegenden Arbeit wird klar, wie viel Spaß die Schüler und Schülerinnen beim Bau und Starten von Raketen haben. Beide Projektstage zeigen Kinder und Jugendliche, die am Ende von den Raketen gar nicht mehr genug bekommen konnten. Die Geschosse

ließen das Selbstbewusstsein derer wachsen, die sich anfänglich nicht trauten, sie fliegen zu lassen oder sich gar in der Nähe des Startplatzes aufzuhalten, später jedoch mutig und stolz auch ihre Modelle in die Luft schossen. Die Fotos der Mädchen und der Grundschulkinder in dieser Arbeit zeigen beeindruckte und glückliche Gesichter. Die Grundschulkinder erwiesen sich als besonders geschickt im Anfertigen von Wasserraketen und hatten von vornherein große Lust auf den Projekttag. Nach anfänglicher Zurückhaltung legten die Mädchen, die am Girls' Day teilnahmen, ihre Coolness ab und jubelten begeistert den durch die Luft sausenden Raketen hinterher. Beide Gruppen bestätigten, dass das Abfeuern von Raketen etwas Aufregendes und Spaßiges ist.

Diese Arbeit liefert genügend Gründe, Raketenmodelle in der Schule auszuprobieren. Man muss sich nur die Faszination an schnellen und lauten Geschossen vor Augen halten. Die Konstruktion der Modelle entwickelt handwerkliches Geschick und macht jeden „Raketeningenieur“ stolz, wenn er oder sie sauber gearbeitet hat und die angefertigte Rakete erfolgreich in den Himmel schießt. Es sollte jedem Lernenden in seiner Schullaufbahn ermöglicht werden, solche Erfolgserlebnisse zu erfahren, die zwangsläufig auftreten, wenn etwas Selbstentwickeltes funktioniert.

Deshalb kann ich mich nur für den Einsatz von Raketen im Schulunterricht aussprechen und hoffe, dass der Leser oder die Leserin dieser Arbeit Lust verspürt, selbst zum „Raketeningenieur“ zu werden und diese faszinierenden Objekte ausprobiert!

9 Literaturverzeichnis

Bücher und Artikel:

BRÄUCKER, R.; GÖRLICH, H.; HEISELBETZ, B.: *Forschung zum Anfassen und Erleben - Einblicke in die DLR_School_Labs* – In: Naturwissenschaften im Unterricht-Physik, 2005, Nr.90

HÖFLING, O.: *Physik Band II Teil*, Dümmler 1978

Lehrplan für bayerische Grundschulen 2009

Lehrplan für bayerische Gymnasien 2009

Lehrplan für bayerische Hauptschulen 2009

Lehrplan für bayerische Realschulen 2009

Physikalische Freihandexperimente Band 1 – Mechanik, Aulis Verlag Deubner 1998

PHYWE-Systemkatalog Physik: *Inklusive Preisliste, Physik-Basisgeräte*, 2009

TIPLER, P.A.; MOSCA, G.: *Physik – Für Wissenschaftler und Ingenieure*, Spektrum Akademischer Verlag, 2004

WEISS, D.: *Behandlung der Raketenphysik in der Oberstufe* – In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, 1972, Band 25, Heft 1

WILKE, H.-J.: *Überraschende Experimente mit Kunststoffflaschen* – In: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 52, 1999, Nr. 4

Abbildungen:

Abb. 1: Fotografie von Thomas Wilhelm

Abb. 2: Graph entnommen aus WEISS, D.: *Behandlung der Raketenphysik...*

Abb. 3: Graph entnommen aus WEISS, D.: *Behandlung der Raketenphysik...*

Abb. 4: Skizze von Thomas Wilhelm

Abb. 5: Fotografie von Thomas Wilhelm

Abb. 6: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 7: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 8: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 9: <http://www.opitec.de/opitec-web/articleNumber/104966/ksklei;jsessionid=590E6A615B57BC805879F130C0D720A3>

Abb. 10: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 11: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 12: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 13: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 14: Skizze angefertigt von Analena Kamprad

Abb. 15: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 16: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 17: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 18: <http://datal.opitec.de/img/downloads/technikdownloads/Sonstige/9-10-Jahre/105386bd.pdf>

Abb. 19: [http://de.wikipedia.org/wiki/Treibsatz_\(Modellrakete\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Treibsatz_(Modellrakete))

Abb. 20: <http://datal.opitec.de/img/downloads/technikdownloads/Sonstige/9-10-Jahre/105386bd.pdf>

Abb. 21: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 22: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 23: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 24: Schema entnommen aus
<http://datal.opitec.de/img/downloads/technikdownloads/Sonstige/9-10-Jahre/105386bd.pdf>

Abb. 25: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 26: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 27: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 28: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 29: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 30: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 31: Fotografie von Thomas Wilhelm

Abb. 32: Fotografie von Thomas Wilhelm

Abb. 33: Fotografie von Analena Kamprad

Abb. 34: Tabelle entnommen <http://www.modell-raketen.de/modellraketencodex.asp>

Abbildungen im Kapitel 10.6 sind Fotografien von Thomas Wilhelm und Analena Kamprad

10 Anhang

10.1 IMR Sicherheitskodex

„1. Konstruktion – Meine Modellrakete wird nur aus leichtem Material wie Papier, Holz, Plastik und Gummi, angepasst an die Motorstärke und Leistung der Modellrakete, hergestellt. Ich werde keine Metallteile für die Spitze, den Körper und die Flossen einer Modellrakete verwenden.

2. Motoren – Ich verwende nur fabrikmäßig hergestellte und geprüfte Raketenmotoren in der Weise, wie sie vom Hersteller empfohlen werden. Ich werde nicht versuchen, den Motor, seine Einzelteile oder dessen Zusammensetzung in irgendeiner Weise zu ändern.

3. Bergung – Ich verwende immer ein Bergungssystem, das mein Modell wieder sicher zur Erde zurückbringt und somit immer wieder verwendet werden kann. Ich werde ausschließlich feuerfestes Schutzmaterial verwenden, sofern dieses auf Grund der Konstruktion des Modells notwendig ist.

4. Gewichtsbeschränkungen – Meine Modellrakete wird nie mehr als 1500 Gramm Startgewicht haben, der Motor nie mehr 320 Newton-Sekunden Gesamtimpuls haben. Meine Modellrakete wird nicht mehr als das empfohlene maximale Startgewicht des Treibsatzherstellers für den verwendeten Motor haben oder ich werde die vom Hersteller des Modells für mein Modell empfohlenen Motoren benutzen.

5. Stabilität – Ich werde die Stabilität meiner Modellrakete vor dem ersten Start testen, ausgenommen bei Modellen mit bereits getesteter Stabilität.

6. Nutzlasten – Meine Modellrakete wird niemals lebende Tiere befördern (ausgenommen Insekten) oder entflammbare, explosive oder sonstige gefährliche Nutzlasten.

7. Startgebiet – Ich werde meine Modellrakete im Freien auf einem von leicht brennbaren Material wie trockenem Grass oder Büschen gereinigtem, übersichtlichen Gelände ohne große Bäume, Stromleitungen und Gebäuden, starten. Das Startgebiet wird mindestens so groß wie die Empfehlungen auf der nachstehenden Tabelle sein.

8. Startsystem – Ich werde meine Modellrakete von einer stabilen Startvorrichtung starten, die eine zuverlässige Führung bis zum Erreichen einer Geschwindigkeit, die eine sichere Flugbahn gewährleistet, garantiert. Zum Schutz vor Augenverletzungen ist meine Abschussrampe immer so aufgestellt, dass das Ende des Leitstabes über der Augenhöhe liegt, andernfalls verwende ich eine Schutzkappe, wenn ich mich nähere. Ich verwende eine Schutzkappe oder zerlege meinen Leitstab, wenn er nicht benutzt wird. Ich werde den Leitstab niemals aufgerichtet lagern. Meine Startrampe hat einen Strahlableiter, um den Motorausstoß beim Start nicht direkt auf die Erde zu lenken. Ich werde die Umgebung meiner Startvorrichtung immer von trockenem Gras und Unkraut und/oder anderem leichtbrennbarem Material säubern.

9. Zündsystem – Ich verwende ein elektrisches und ferngesteuertes Zündsystem zum Start meiner Modellrakete. Es enthält einen Startknopf, der nach dem Loslassen in die "Aus"-Stellung springt. Das System enthält eine entfernbare Sicherheitsunterbrechung ("Sicherheitsschlüssel"), die mit dem Startknopf zusammenwirkt. Alle Anwesenden halten einen Sicherheitsabstand von mindestens 4,5 Meter beim Start eines Modells bis zu 30 Ns Gesamtschub und 9 Meter bei mehr als 30 Ns Gesamtschub. Ich verwende nur elektrische Zünder, die vom Motorenhersteller empfohlen werden und die den Motor innerhalb von einer Sekunde nach Aktivierung des Startknopfes zünden.

10. Sicherheit beim Start – Ich vergewissere mich, dass alle Personen im Startbereich über den bevorstehenden Start informiert sind und den Start des Modells sehen können, bevor ich mit meinem hörbaren 5-Sekunden-Countdown beginne. Ich starte mein Modell nicht in einer Weise, dass es gegen ein Hindernis fliegen kann. Im Falle einer Fehlzündung stelle ich sicher, dass sich niemand dem Modell oder der Startrampe nähert, bevor die Sicherheitsunterbrechung nicht aktiviert bzw. die Batterie vom Zündsystem entfernt wurde. Ich warte mindestens eine Minute, bevor ich jemandem erlaube, sich der Startrampe zu nähern.
11. Flugbedingungen – Ich starte meine Modellrakete nur bei Windgeschwindigkeiten unter 30 km/h. Ich starte meine Modellrakete so, dass sie nicht in Wolken oder gegen Flugzeuge in der Luft fliegt oder in einer anderen für die Sicherheit von Personen und Sachen gefährlichen Art und Weise.
12. Vortest – Bei Startversuchen mit ungeprüften Modellkonstruktionen oder Methoden überprüfe ich die Zuverlässigkeit meiner Modellrakete durch entsprechende Vortests. Der Erststart einer ungeprüften Konstruktion wird unter komplettem Ausschluss von nichtbeteiligten Personen durchgeführt.
13. Winkel – Mein Abschusswinkel liegt immer innerhalb 30 Grad von der Vertikalen. Ich benutze Modellraketreibsätze niemals, um damit Gegenstände horizontal anzutreiben.
14. Gefahren bei der Bergung – Wenn eine Modellrakete in einer Stromleitung oder an einen anderen gefährlichen Ort landet, werde ich nicht versuchen, sie zu bergen.“³⁸

³⁸ www.modell-raketen.de

10.2 Startplatzabmessungen³⁹

Gesamtimpuls (Newton-Sekunden)	Motortyp	Minimale Startplatz- ausdehnung (in Me- tern)
0,00-1,25	¼ A, ½ A	15
1,26 – 2,50	A	30
2,51 – 5,00	B	60
5,01 – 10,00	C	120
10,01 – 20,00	D	150
20,01 – 40,00	E	300
40,01 – 80,00	F	300
80,01 – 160,00	G	300
160,01 – 320,00	2 x G	450

Abb. 34: Tabelle für Startplatzabmessungen

³⁹ www.modell-raketen.de

10.3 Bastelanleitung für die Wasserraketen⁴⁰

Wir bauen eine Rakete!

Diese Materialien wirst du brauchen:

- Eine 1l-Plastikflasche
- Bastelkarton
- Einen halben Tennisball
- Klebeband oder Tesafilm
- Schere
- Lineal
- Stifte

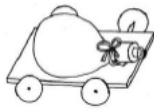


Und so wird's gemacht:

- Nimm deine Plastikflasche und entferne das Etikett
- Nun wird der halbe Tennisball mit Heißkleber auf den Flaschenboden geklebt → hier hilft dir deine Betreuerin Analena oder deine Lehrerin
- Warte bis der Kleber getrocknet ist; während du wartest kannst du schon einmal deine Lieblingsfarbe für die Finnen heraussuchen
- Schneide aus dem Bastelkarton drei Finnen aus (die Schablone bekommst du von deiner Betreuerin Analena) → die Finnen sind wie Flügel für deine Rakete, damit sie später stabil fliegen kann
- Befestige die drei Finnen mit Klebeband oder Tesafilm an der Flasche
- Nun ist die Rakete fast fertig! Du kannst sie jetzt noch schön bunt bemalen oder bekleben

⁴⁰ Erstellt von Analena Kamprad

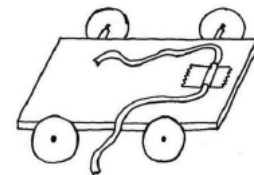
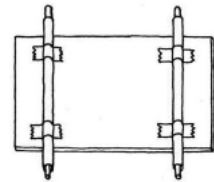
10.4 Bastelanleitung für den Luftballonraketenwagen⁴¹



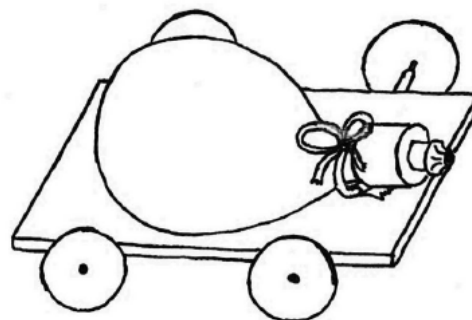
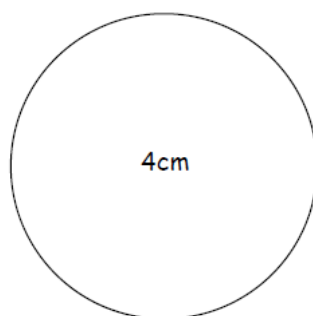
Wir bauen ein Auto mit Luftballonantrieb.



1. Befestige mit Klebeband auf der Rückseite deines Pappkartons zwei Strohhalm.
2. Schneide von jedem Strohhalm soviel ab, dass nur noch 1cm über den Pappkarton übersteht.
3. Durch die Strohhalm steckst du jetzt jeweils einen Schaschlikspieß. Diesen schneidest du auch ab. Die Schaschlikspieße sollen auf jeder Seite einen halben Zentimeter länger als der Strohhalm sein.
4. Schneide aus Pappe vier Kreise mit 4cm Durchmesser aus. Dazu kannst du die Schablone auf dem Arbeitsblatt benutzen.
5. Bohre dann mit einem spitzen Stift in jeden Kreis ein Loch.
6. Klebe die Pappräder an den Schaschlikspießen fest.
7. Schneide ein 30cm langes Stück Schnur ab und klebe es über einer der Achsen fest.
8. Versuche den Luftballon soweit du kannst über den Spülmittelverschluss zu stülpen.
9. Mit der Schnur kannst du jetzt den Luftballonantrieb auf deinem Auto festbinden.
10. Jetzt musst du den Luftballon nur noch aufblasen und ... huil! Schon flitzt dein Auto davon.



Schablone für die Pappräder:



⁴¹ www.edu.lmu.de/supra/technisches.../ab_auto_luftballonantrieb.pdf

10.5 Evaluationszettel

Wie fandest du das Schülerlabor?



Und wieso?

Mir hat das Raketen basteln sehr
viel Spaß gemacht. Die anderen Versuche
haben mir aber auch sehr gut gefallen.

Wie fandest du das Schülerlabor?



Und wieso?

Ich finde alles sehr schön. Das Raketen
basteln war ^{und} lustig, was wir das Zimmer bereichert
haben. Mit dem Gespenst, das war auch schön.

Wie fandest du das Schülerlabor?



Und wieso?

Weil wir die Raketen die wir gebaut
haben dann ~~stark~~ starten durften

Wie fandest du das Schülerlabor?



Und wieso?

Ich finde es super weil wir durften
eine Rakete bauen, aber auch die anderen
Experimente waren klasse. Es war ein
schöner Tag.

Wie fandest du das Schülerlabor?



Und wieso?

Weil ich es doch fand das wir nach
jedem Experiment was schreiben
mussten.

Wie fandest du das Schülerlabor?



Und wieso?

Mir hat das Raketenbauen super
gefallen

Wie fandest du das Schülerlabor?



Und wieso?

Die Raketen haben mir
besonders gut gefallen.

Wie fandest du das Schülerlabor?



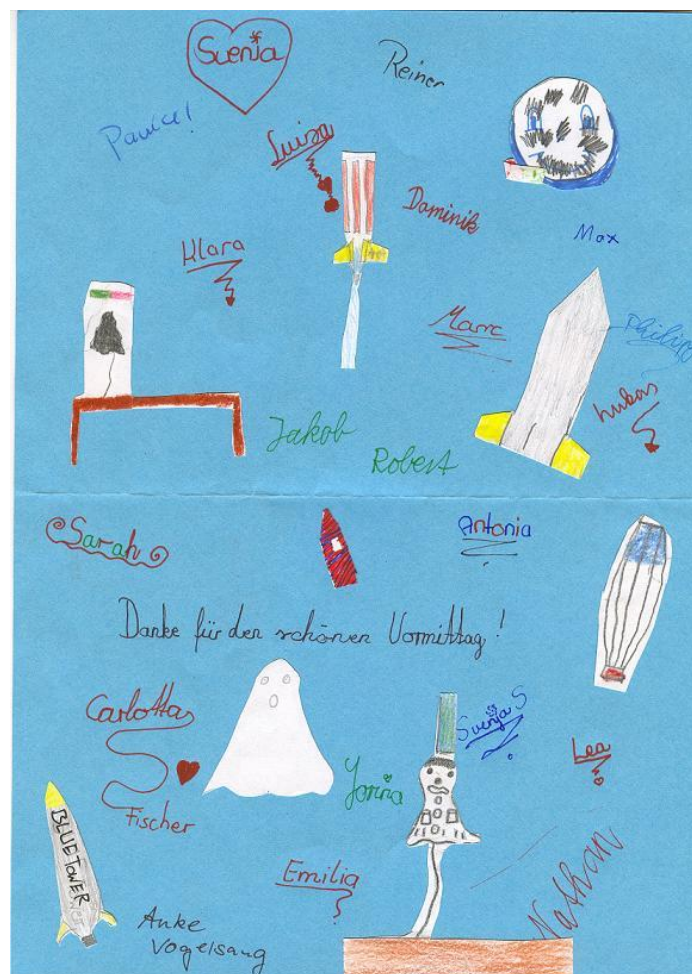
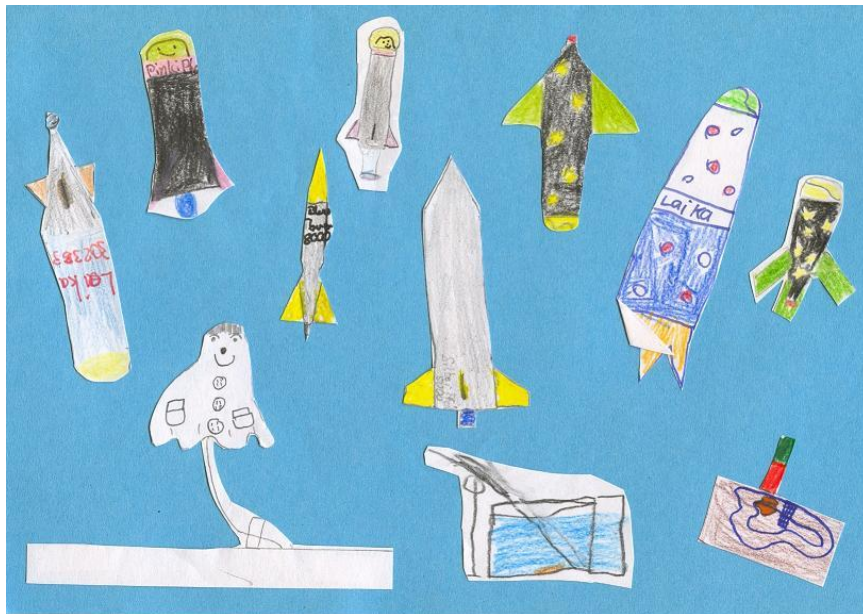
Und wieso?

Weil wir Raketen gebaut
haben

Die **Seiten 87 bis 91** wurden aus datenschutzrechtlichen Gründen **entfernt**, da sie Fotos von Grundschulern enthielten, für die keine Genehmigung zur Veröffentlichung im Internet vorliegt. Wir bitten um Verständnis. Die vollständige Arbeit kann bei Herrn Dr. Wilhelm eingesehen werden.

10.7 Dankeskarte der Grundschulkinder

Diese wunderschöne Dankeskarte der Grundschulkinder erreichte mich wenige Tage nach dem Projekttag und zeigt deutlich die Begeisterung der Schüler und Schülerinnen für Raketen.



11 Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle ganz herzlich bei allen bedanken, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen haben.

Andreas Häusler für die Zusammenarbeit am Projekttag der Grundschulkinder und die Erstellung der Evaluationszettel, die ich freundlicherweise mitbenutzen durfte.

Des Weiteren danke ich Frau Löffler, der guten Seele der Physikvorbereitung, und allen Mitarbeitern der wissenschaftlichen Werkstatt für die Bereitstellung und das Zurechtschneiden von Baumaterialien für die Raketen.

Vielen Dank auch an Steven Kimbrough, der mir seine selbstkonstruierte Startrampe für Wasserraketen zur Verfügung stellte.

Der ganzen Klasse 4b der Grundschule Zell mit ihrer Lehrerin Frau Vogelsang, die sich als „Versuchskaninchen“ für den Bau von Wasserraketen bereitstellten. Es war auch für mich ein wunderschöner und aufregender Tag, der mir sehr viel Spaß bereitet hat!

Danke auch an Frau Spanheimer für die Organisation des diesjährigen Girls´ Day an der Universität Würzburg und dafür, dass sie mich hat mitwirken lassen.

Außerdem danke ich Max Herpich für die Unterstützung und guten Ratschläge beim Raketenbauen. Ganz besonderer Dank geht an meinen Vater, Michael Kamprad, der mich durch sein Hobby „Modellraketen“ erst auf die Idee brachte, die Staatsexamensarbeit über Raketen zu schreiben. Er verstand es, mich für Raketen zu begeistern und war stets sehr engagiert darin, mich mit gemeinsamen Raketenstarts seiner selbstkonstruierten Modellraketen und Informationen zum Bau von diesen Modellen beim Verfassen der Arbeit zu unterstützen. Ich hoffe, dass der Verlust einer seiner Modellraketen in einem Maisfeld nicht allzu schmerzlich ist!

Besonderer Dank geht auch an meine Mutter, Inge Kamprad, die mir bei der sprachlichen und grammatikalischen Ausarbeitung der Arbeit mit guten Tipps und Verbesserungsvorschlägen weiterhalf.

Vielen Dank auch an den Rest meiner lieben Familie und meinen Freund Sebastian Landeck für die Unterstützung und aufmunternden Worte in den letzten paar Monaten.

Außerdem möchte ich noch besonders dem Betreuer dieser Arbeit Dr. Thomas Wilhelm danken, der es versteht Arbeitsgemeinschaften zu initiieren, die für alle Beteiligten von äußerstem Nutzen sind und sie in ihrem Schaffen gemeinsam weiterbringen. Seine Betreuung war wirklich überdurchschnittlich unterstützend!

Herzlichen Dank!

12 Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit „Raketen in der Schule“ selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle verwendeten Zitate oder sinnübernommene Stellen aus anderen Werken wurden von mir gekennzeichnet. Sämtliche Quellenangaben zu den Abbildungen sind im Literaturverzeichnis zu finden.

Würzburg, den