

Lehrstuhl für Didaktik der Physik

**Zulassungsarbeit zur ersten Staatsprüfung nach LPO I für
das Lehramt an Gymnasien**

Mikrogravitationsexperimente im Physikunterricht

Von:

Tobias Schüttler

Betreuer:

StR Martin Hopf

Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner

Vorwort

Nach heutzutage gängiger Lehrmeinung wird die Erde seit etwa vier Milliarden Jahren von Leben bevölkert. Um sich in ihrer Umwelt zurechtzufinden, müssen sich Lebewesen orientieren können. Höhere Lebewesen können dies mit Hilfe ihrer Sinnesorgane, indem sie optische, thermische, akustische oder chemische Reize wahrnehmen und auswerten. All diesen Reizen gemein ist, dass sie sich innerhalb der letzten vier Milliarden Jahren drastisch verändert haben. Lediglich ein einziger äußerer Reiz ist seit Bestehen der Erde, zu allen Tages- und Nachtzeiten, im Sommer wie im Winter und überall, wo man sich auf der Erde befindet, im Wesentlichen gleich und unverändert: die Schwerkraft.

Und so verwundert es kaum, dass bereits kleinste und primitivste Lebewesen Methoden entwickelt haben, die Schwerkraft als Orientierungshilfe zu nutzen. Als Beispiel seien hier die so genannten Pantoffeltierchen (Ciliaten) erwähnt. Man schätzt¹, dass diese Einzeller bereits seit 1,3 bis 1,5 Milliarden Jahren existieren.

Sie leben im Wasser, in Teichen und Pfützen und ernähren sich von Fäulnisbakterien. Diese wiederum zersetzen organisches Material, das ins Wasser gefallen ist, wie zum Beispiel Laub, und befinden sich daher vermehrt an der Wasseroberfläche. Insofern ist es für Ciliaten ein Evolutionsvorteil, zu „wissen“, wo oben und unten ist.

Auch für den Menschen, sowie für alle das Land bevölkernden Lebewesen, ist es essentiell, den Unterschied zwischen oben und unten zu kennen. Ohne dieses Kenntnis wäre jegliche Art der Fortbewegung undenkbar.

Der Frage, was passiert, wenn der Schwerkraftreiz fehlt, widmet sich die Mikrogravitationsforschung. In dieser Zulassungsarbeit soll versucht werden, das Thema Mikrogravitation in den Physikunterricht zu bringen.

Dazu wurde eine Methode entwickelt, wonach es möglich ist, für die Zeit von 0,6 Sekunden Schwerelosigkeit zu erzeugen. Zwar sind 0,6 Sekunden nicht sehr lang, dennoch wird sich herausstellen, dass, dank moderner Methoden der Experimentauswertung, bereits diese vergleichsweise kurze Zeit genügt, um einige verblüffende Phänomene unter Mikrogravitationsbedingungen zu erkennen.

¹http://www.dlr.de/Schoollab/Koeln_Porz/Experimente/Gravitationsbiologie/Experiment/experimentbeschreibung_gravitationsbiologie.pdf (09.06.2006)

Vorwort	2
1 Die Schwerkraft – Einige grundlegende Gedanken	5
2 Schwerelosigkeit – Mikrogravitation – fachdidaktische Vorüberlegungen.....	7
2.1 Masse, Gewicht und Schwerkraft.....	7
2.2 Warum Mikrogravitationsexperimente im Schulunterricht?.....	8
3 Wo herrscht Mikrogravitation?	11
3.1 Wie entsteht Mikrogravitation?.....	11
3.2 Der Freie Fall	13
3.2.1 Freier Fall aus geringer Höhe, ohne Luftwiderstand.....	13
3.2.2 Fall aus geringer Höhe mit Luftwiderstand.....	14
3.2.3 Freier Fall aus großer Höhe.....	17
4 Mikrogravitationsforschung	18
4.1 Wo findet Mikrogravitationsforschung statt?	18
4.1.1 Falltürme	19
4.1.2 Parabelflüge.....	19
4.1.3 Sounding Rockets.....	20
4.1.4 Bemannte Weltraummissionen	21
4.2 Aktuelle Fragestellungen der Mikrogravitationsforschung.....	22
4.2.1 Humanphysiologische Untersuchungen	22
4.2.2 Biologische Fragestellungen	25
4.2.3 Physikalisch- technische Forschungsinhalte	28
5 Mikrogravitation im Physikunterricht – der Minifallturm	35
5.1 Entstehungsgeschichte	35
5.2 Aufbau.....	36
5.3 Die Experimente.....	39
5.3.1 Experiment 1: „Systemcheck“	39
5.3.2 Experiment 2: „Briefwaage“	40
5.3.3 Experiment 3: „Sanduhr“	41
5.3.4 Experiment 4: „Auftrieb“	42
5.3.5 Experiment 5: „Verbrennung“	45
5.3.6 Experiment 6: „Pendel“	47
5.3.7 Weitere Experimente.....	50
5.4 Der Minifallturm im Einsatz	51

5.4.1	Die ersten beiden Schülergruppen.....	51
5.4.2	Veränderungen nach den ersten Probedurchgängen	52
5.4.3	Die erste Lehrergruppe.....	53
5.4.4	Veränderungen nach der ersten Lehrergruppe	53
5.4.5	Die zweite Lehrergruppe.....	54
5.4.6	Die dritte Schülergruppe	55
5.4.7	Erfahrungen mit weiteren Schüler- und Lehrergruppen	55
5.4.8	Zusammenfassung der Ergebnisse der verschiedenen Gruppen	57
6	Weitere Experimente zum Thema Mikrogravitation	63
6.1	Freihandexperimente.....	63
6.2	Ein fächerübergreifendes Experiment zum Thema Schwerkraft	64
7	Abschließende Bemerkungen.....	68
7.1	Verzeichnis der verwendeten Literatur	69
7.2	Abbildungsverzeichnis	71
8	Anhang	76
8.1	Aufbau der Fallbox.....	76
8.1.1	Allgemeines.....	76
8.1.2	Aufbau der Fallbox.....	77
8.1.3	Aufbau der Experimente	80
8.1.4	Aufbau des Turmes	83
8.1.5	Benötigte Werkzeuge	84
8.1.6	Stückliste	85
8.1.7	Bezugsquellen	86
8.2	Die Mikrogravitationsampel	88
8.2.1	Funktionsweise.....	88
8.2.2	Verwendete Bauteile	90

1 Die Schwerkraft – Einige grundlegende Gedanken

Bereits seit Jahrhunderten machen sich Menschen Gedanken über die Schwerkraft. Woher kommt sie und kann man sie abschalten? Ist sie überall auf der Erde gleich und warum wirkt sie immer anziehend aber nie abstoßend? Viele Menschen träumen davon, die Schwerkraft überwinden zu können, um frei im Raum umherschweben zu können. Von einigen Menschen, wie dem italienischen Mönch Josef von Copertino wird berichtet, dies tatsächlich gekonnt zu haben. Der Legende nach soll er die Fähigkeit gehabt haben zu schweben. Einmal soll er sogar 60 Meter hoch geflogen sein, um ein zehn Meter hohes Kreuz vom Himmel in Empfang zu nehmen, das er dann auf die Erde gesetzt haben soll².

Aber auch heute noch sind Menschen empfänglich für angeblich mysteriöse Schwerkraftphänomene. Im so genannten Oregon-Strudel sollen Bäume schräg nach oben wachsen, Häuser verbiegen sich und Wasser fließt angeblich nach oben³. Auch wenn diese heute noch diskutierten Phänomene inzwischen als optische Täuschungen entlarvt wurden, sind dennoch viele Fragen rund um die Schwerkraft ungeklärt.

Die Gravitationskraft ist eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Verglichen mit den anderen drei, der Starken Wechselwirkung, der Schwachen Wechselwirkung und der Elektromagnetischen Wechselwirkung, ist die Gravitationskraft äußerst gering. Tatsächlich macht ihre Stärke lediglich 10^{-38} derjenigen der Starken Wechselwirkung aus.

Heutzutage nimmt man an, dass die Gravitation durch Gravitonen als Austauscheteilchen vermittelt wird. Solche wurden bislang jedoch experimentell noch nicht gefunden. Es wird vermutet, dass Gravitonen ungeladene masselose Teilchen sind, die den Spin 2h tragen.

Erzeugt wird die Gravitation durch die Masse, die in Analogie zur Farb-, elektrischen und schwachen Ladung als „Gravitationsladung“ bezeichnet werden könnte⁴.

Die erste mathematisch formulierte Theorie der Gravitation wurde von Isaac Newton entwickelt. In seinem fundamentalen Werk „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“ stellte er 1686⁵ unter anderem fest, dass die Schwerkraft nicht auf die Erde beschränkt ist, sondern der Grund dafür ist, dass die Himmelskörper nicht einfach auseinander fliegen.

Daraus folgerte er, dass die Schwerkraft unendlich weit reicht. Als Ergebnis seiner Experimente gelang Newton die mathematische Formulierung eines Schwerkraftgesetzes,

² http://de.wikipedia.org/wiki/Josef_von_Copertino (09.06.2006)

³ <http://www.oregonvortex.com/> (09.06.2006)

⁴ Paul A. Tipler, Ralph A. Llewellyn, 2002: Moderne Physik. 1. Auflage, S. 758

⁵ http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph11/geschichte/02newton/newton.htm (21.06.2006)

wonach die Schwerkraft proportional zum Produkt der sich anziehenden Massen und umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstandes ist.

$$F \propto \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (*)$$

Später gelang es dem englischen Physiker Henry Cavendish die vermittelnde Naturkonstante auf zwei Nachkommastellen genau zu bestimmen.

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad ; \quad G = 6,67 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$$

Diese Formel lässt sich für erdnahe Vorgänge bekanntermaßen zu

$$F = m \cdot g; \quad g = G \frac{m_{\text{Erde}}}{r_{\text{Erde}}^2} = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

vereinfachen. Der Ortsfaktor g hängt wesentlich davon ab, wo man sich auf der Erde befindet. Er kann zwischen $9,745 \text{ m/s}^2$ am Äquator und $9,882 \text{ m/s}^2$ an den Polen schwanken. Der Grund hierfür ist in der Abflachung der Pole zu suchen. Der Erdradius ist an den Polen ca. 21 km kleiner als am Äquator, woraus mit Gleichung (1) an den Polen eine größere Anziehungskraft resultiert. Diese Variabilität der Schwerkraft der Erde ist mit lediglich gut 1% aber zu gering, um im Alltag bemerkt zu werden.

Die Norm-Fallbeschleunigung (Norm-Ortsfaktor) ist definiert als $9,80665 \text{ m/s}^2$.

Obwohl die Schwerkraft die mit Abstand schwächste Kraft der vier fundamentalen Wechselwirkungen ist, ist es doch sie, die Lebewesen im Alltag am deutlichsten wahrnehmen. Jede einzelne Bewegung ist ein Kampf gegen die Schwerkraft. Säuglinge brauchen etwa ein Jahr lang, bis ihre Muskeln und Knochen stark genug sind, um beim aufrechten Gang der Schwerkraft zu trotzen. Jeden Morgen, wenn wir aufstehen, müssen wir die Schwerkraft überwinden.

Es stellt sich die Frage, was wäre, wenn es nicht so wäre. Wie würden Lebewesen aussehen, die sich unter geringerer oder größerer Schwerkraft entwickelt hätten? Wie kann man Astronauten helfen, lange Zeiten unter Schwerelosigkeit besser zu überstehen? Wie verhalten sich physikalische Vorgänge in der Schwerelosigkeit?

2 Schwerelosigkeit – Mikrogravitation – fachdidaktische Vorüberlegungen

Der Begriff Schwerelosigkeit ist irreführend, da er impliziert, dass es einen Zustand völlig ohne Schwerkraft geben könnte. Das ist aber in der materiellen Welt undenkbar! Jede Masse, auch ein einzelnes Elementarteilchen, ja sogar Photonen, erzeugen Schwerkraft. Diese ist nach der derzeitigen Theorie in ihrer Reichweite unbegrenzt. Es ist also sinnvoller, anstatt von Schwerelosigkeit von Mikrogravitation zu sprechen.

Ein weiterer Punkt, der gegen die Verwendung des Begriffs Schwerelosigkeit spricht, ist, dass man auf die Idee kommen könnte, Schwerelosigkeit könne nur dann entstehen, wenn keine, oder nur ganz wenig Schwerkraft wirkt. Das trifft allerdings auch nicht zu. Bei Parabelflügen herrschen Mikrogravitationsbedingungen, obwohl die verwendeten Flugzeuge nur in Höhen von bis zu 8500 Meter fliegen, also noch stark von der Erde angezogen werden.

Deshalb soll im Folgenden der Begriff Mikrogravitation oder „Gewichtslosigkeit“ im Sinne von „man kann mit einer Waage kein, oder fast kein Gewicht messen“ verwendet werden.⁶

2.1 Masse, Gewicht und Schwerkraft

Bereits in der achten Klasse des Gymnasiums werden im Physikunterricht die Begriffe Masse und Gewicht eingeführt.⁷ Die Relevanz dieser zentralen Begriffe der Mechanik geht aus ihrem direkten Alltagsbezug hervor: Mit dem Wiegen von Körpern haben die meisten Menschen alltäglich zu tun. Sei es im Supermarkt, beim Einkauf von Obst und Gemüse oder morgens, wenn man sich zur Kontrolle des Körpergewichts auf die Waage stellt.

Man muss daher davon ausgehen, dass Schüler der achten Klasse bereits ein gefestigtes Konzept davon haben, was „Gewicht“ ihrer Meinung nach ist.

Nun ist aber das Vorwissen eines Lernenden von entscheidender Bedeutung dafür, wie ein Thema verstanden wird.⁸ Es fällt daher vielen Schülern schwer, den Gewichtsbezug richtig einzuordnen, sie „wissen“ ja bereits aus eigener Erfahrung, was Gewicht ist. Man sollte

⁶ Dr. Richard Bräucker, DLR, Persönliche Mitteilung, Februar 2006

⁷ <http://www.isb.bayern.de/isb/download.asp?DownloadFileID=c0d7ef7d0f1980b221720e61ad6ee25d> (19.06.2006)

⁸ Peter Häußler/ Wolfgang Bündler/ Reinders Duit u.a. (1998): Perspektiven für die Unterrichtspraxis, Kiel S. 172 ff

meinen, dass über so zentrale Begriffe wie Gewicht, Masse und Schwerkraft zumindest im Kreis der Lehrbuchautoren Einstimmigkeit herrschen würde. Dem ist aber ganz und gar nicht so.

In verschiedenen Schulbüchern findet man die unterschiedlichsten, manchmal fragwürdigen, Definitionen dieser Begriffe. Zum Beispiel: „Die Gewichtskraft wirkt auf der Erde senkrecht nach unten (in Richtung auf den Erdmittelpunkt). Sie entspricht der Anziehungskraft zwischen dem Körper und der Erde. Auf der Erde ist die Gewichtskraft ungefähr sechsmal größer als auf dem Mond.“⁹

In dieser Definition wird die Messgröße „Gewichtskraft“ mit der Eigenschaft von Materie „Schwerkraft“ zu erzeugen gleichgesetzt und zudem noch eine falsche Information übermittelt: Die Gewichtskraft ist auf der Erde nicht sechsmal größer, sondern sechsmal so groß, wie auf dem Mond.

Auch andere Definitionen von Masse und Gewicht zeigen ähnliche Schwachstellen auf, was die Annahme nahe legt, dass auch manche Lehrer nicht ganz genau wissen, wie Masse, Gewicht und Schwerkraft denn tatsächlich zu definieren sind. Gerade weil Schüler bereits ein gefestigtes Konzept davon haben, was Gewicht ist, ist es aber unumgänglich, dass man im Unterricht hier begrifflich sehr exakt ist.

Es ist klar zwischen einer Messgröße, wie dem Gewicht, und einer Eigenschaft, wie der Masse eines Körpers, zu unterscheiden. Das Schwerfeld, das jede Masse erzeugt ist, zumindest nach heutiger Erkenntnis, nicht veränderbar. Wohl aber ist es möglich, in gleicher Entfernung zur Erde bei Körpern gleicher Masse mit der selben Waage unterschiedliche Gewichte zu *messen*, nämlich dann, wenn sie sich in unterschiedlich beschleunigten Bezugssystemen befinden.

2.2 Warum Mikrogravitationsexperimente im Schulunterricht?

Auf die Frage, warum Astronauten in der internationalen Raumstation ISS „schwerelos“ sind, erhält man häufig¹⁰ zwei falsche Antworten. Manche Menschen denken, es liege daran, dass die Astronauten soweit von der Erde weg seien, andere meinen, im luftleeren Raum existiere keine Erdanziehung. Beide Begründungen sind offensichtlich falsch.

⁹ http://www.physik.uni-regensburg.de/didaktik/gem_Mat/Schuelervorst/Grundbegr_%20Mechanik.pdf (20.06.2006)

¹⁰ Deutsche Physikalische Gesellschaft, Fachverband Didaktik (Hrsg.), 1998: Didaktik der Physik: Vorträge – Physikertagung 1998 – Regensburg, S. 124

Die ISS befindet sich in einer Höhe von ungefähr 400 km über dem Erdboden. Dort beträgt die Erdanziehung noch ca. 89% derer auf dem Erdboden. Außerdem gibt es am Himmel eine ganze Reihe von Beispielen dafür, dass die Schwerkraft auch auf weit entfernte Objekte noch Wirkung zeigt. Es sei hier nur der fast 400 Millionen Kilometer entfernte Erdenmond genannt, der nur deshalb nicht in den Weiten des Alls verschwindet, weil er und die Erde sich gegenseitig anziehen.

Der Mond eignet sich auch dafür, die zweite Ansicht, im luftleeren Raum sei man gewichtslos, zu widerlegen. Wie die Filme der Mondlandungen zeigen, herrscht dort ebenfalls Schwerkraft. Diese beträgt zwar nur ein sechstel der Schwerkraft der Erde, hielt die Astronauten aber dennoch auf dem Mond. Allerdings ist die Masse des Mondes zu gering, um eine Atmosphäre zu halten, weshalb man auf dem Mond zwar im luftleeren Raum aber eben nicht gewichtslos ist.

Um „Gewichtslosigkeit“ richtig zu verstehen, ist es unerlässlich, sich im Vorfeld mit dem „Gewicht“ selbst eingehender zu beschäftigen.

Wie oben erwähnt, ist das Gewicht eines Körpers, im Gegensatz zu dessen Masse und auch dessen Schwerfeld, eine Messgröße, nicht etwa eine Eigenschaft. Es ist daher möglich, in unterschiedlich beschleunigten Bezugssystemen unterschiedliche Gewichte ein und desselben Körpers zu messen.

Das Thema Mikrogravitation eignet sich ganz hervorragend, um Schülern klar zu machen, dass man zwar bei einem Parabelflug, unter Mikrogravitationsbedingungen, mit einer Waage kein Gewicht messen kann, dass aber die Schwerkraft immer noch auf das Flugzeug und auch alle darin befindlichen Personen und Gegenstände wirkt. Wäre dies nicht der Fall, dann gäbe es ja auch keinen Grund für das Flugzeug, wieder zur Erde zurückzukehren, also letzten Endes herunter zu fallen.

An dieser Stelle ist allerdings Vorsicht geboten, da Schüler und auch erwachsene oft der Ansicht sind, zum freien Fall eines Körpers sei keine Kraft erforderlich. Es läge vielmehr in der Natur eines Körpers auf die Erde, herunterzufallen.¹¹ Um ihn hingegen hochzuheben, sei eine Kraft erforderlich.

Wie tief verwurzelt diese Vorstellung ist, zeigt sich auch in folgendem Beispiel: Bei einem Parabelflug (vgl. 4.1.2 Parabelflüge) hat man während des ganzen Parabelbogens, also insbesondere auch im aufsteigenden Parabelast Mikrogravitationsbedingungen. Nun ist es so schwer vorstellbar, dass sich ein Körper in einer Aufwärtsbewegung im freien Fall befinden kann, nämlich dann, wenn keine anderen Kräfte auf ihn wirken als die Schwerkraft, dass die

¹¹ Peter Häußler/ Wolfgang Bündler/ Reinders Duit u.a. (1998): Perspektiven für die Unterrichtspraxis, Kiel, S. 181.

meisten Menschen zwar der Meinung sind, man wäre auf dem absteigenden Parabelast „schwerelos“, nicht aber bereits im Aufsteigenden.

Wie stark diese Fehlvorstellung ist, zeigt der bekannte Schauspieler Tom Hanks in einem Interview zum Dreh des Films „Apollo 13“. Die im Film zu sehenden „Schwerelosigkeitsszenen“ wurden tatsächlich auf Parabelflügen gedreht. Und obwohl Tom Hanks also selbst an Parabelflügen teilgenommen hat, beschreibt er den Vorgang folgendermaßen: „Es [das Flugzeug] fliegt auf einer Parabelbahn. Es geht in einem 45-Grad-Winkel nach oben und kippt dann in etwa 7500 Metern Höhe. Wenn es im Senkrechtflug *nach unten* geht, schwebt man im Innern frei herum.“¹²

Demnach wäre die Hälfte der tatsächlichen Zeit unter Mikrogravitation unbemerkt an Tom Hanks vorüber gezogen.

Ein geeignetes Freihandexperiment, um diese Fehlvorstellung zu widerlegen findet man gegen Ende dieser Arbeit im Abschnitt 6.1 Freihandexperimente.

Neben einem Besseren Verständnis der Begriffe „Gewicht“ „Schwerkraft“ und „Schwerelosigkeit“ können Mikrogravitationsexperimente aber auch dazu dienen, sich alltägliche Phänomene, wie zum Beispiel den statischen Auftrieb in Flüssigkeiten besser zu verdeutlichen.

Auf die Frage, warum manche Gegenstände auf dem Wasser schwimmen, erhielt ich von einem Großteil von Schülern die Antwort, weil sie eine geringere Dichte hätten als Wasser. Damit allein ist das Schwimmen aber nicht zu erklären. Wie man sehen kann (vgl. 5.3.4 Experiment: „Auftrieb“) erfährt eine Styroporkugel im Wasser unter Mikrogravitationsbedingungen keinen, beziehungsweise je nach Güte der Mikrogravitation kaum Auftrieb. Genauer: Sie steigt nicht auf, wenn man sie unter Wasser gedrückt hat und dann loslässt, sondern bleibt im Wesentlichen ruhend in ihrer Lage.

Wie aber sollte Mikrogravitation die Dichte von Körpern, also deren Eigenschaften „Masse“ und „Volumen“ verändern? Der Auftrieb kann somit nicht lediglich ein Resultat von Dichteunterschieden sein.

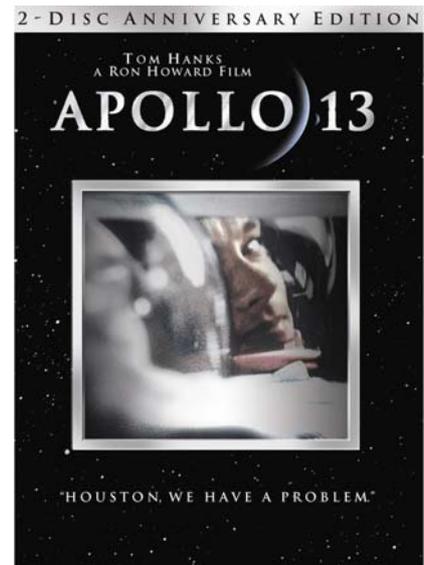


Abbildung 1: Tom Hanks im Film Apollo 13

¹² Universal Pictures (1995): Apollo 13, Disc 2: Making of, Zusatzmaterial, Szene: Der verlorene Mond: der Triumph von Apollo 13 Zeit: 6:50 Minuten

Zu guter letzt sei als Motivation für Mikrogravitationsexperimente noch genannt, dass dieses Thema, wie ich und auch Herr Dr. Bräucker¹³ vom DLR School_Lab in Köln bei den Gewichtslosigkeitsexperimenten mit Schülern feststellen konnten, für Schüler sehr interessant zu sein scheint. Die intrinsische Motivation, sich mit dem Thema „Schwerelosigkeit“ zu beschäftigen war bei den meisten Schülern sehr groß, wohl auch weil das Thema Raumfahrt ein für eine breite Öffentlichkeit sehr interessantes physikalisches Forschungsgebiet ist.

3 Wo herrscht Mikrogravitation?

Wie oben bereits erwähnt, fühlt man sich auf einem Parabelflug „schwerelos“. Im Folgenden soll geklärt werden, wie Mikrogravitation zustande kommt und wo man gewichtslos ist.

3.1 Wie entsteht Mikrogravitation?

Prinzipiell kennen wir drei Möglichkeiten, Mikrogravitation zu erhalten.

Am einfachsten ist die Vorstellung, sich einfach so weit von der Erde zu entfernen, dass die gemessene Schwerkraft auf einen sehr kleinen Teil abfällt. Um auf diese Weise Mikrogravitation im Sinne des Wortes, also ein Millionstel der Schwerkraft der Erde zu erhalten, müsste man sich etwa $6.37 \cdot 10^6$ Kilometer von der Erde entfernen. Dies entspricht einer Entfernung von 17 Mondentfernungen. Keine bemannte Weltraummission hat sich bisher soweit von der Erde entfernt.

Eine andere Möglichkeit, die bereits Jules Vernes¹⁴ erkannte, besteht darin, an den Punkt zwischen Erde und einem Himmelskörper, zum Beispiel dem Mond zu fliegen, an dem sich die Gravitationskräfte der beiden Himmelskörper gerade aufheben.

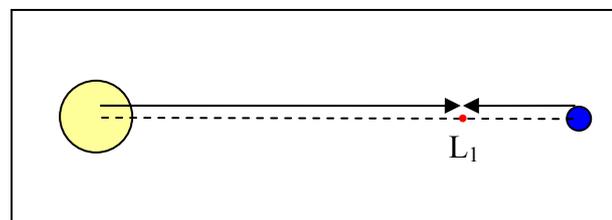


Abbildung 2: Erster Lagrangepunkt

Dieser Ort wird erster Lagrange-Punkt L_1 genannt. Sein Abstand zur Erdoberfläche errechnet sich zu

¹³ Persönliche Mitteilung, Februar 2006

¹⁴ <http://lexikon.astronomie.info/satelliten/julesverne/index.html> (22.06.2006)

$$r = \frac{m_E \cdot r_{EM} + m_M \cdot r_E \pm \sqrt{m_E \cdot m_M} (r_E - r_{EM})}{m_E - m_M} \quad (4)$$

wobei $r_E = 6.378.130$ m der Erdradius, $r_{EM} = 384\,403$ km der Mittelpunktsabstand der Erde zum Mond, $m_E = 5,9736 \times 10^{24}$ kg die Erdmasse und $m_M = 7,35 \times 10^{22}$ kg die Masse des Mondes sind.

Der erste Lagrange-Punkt des Systems Erde Mond liegt also $3,47 \times 10^5$ km vom Erdboden beziehungsweise gut 37.000 km vom Mond entfernt. Dies entspricht ungefähr einem Zehntel der Entfernung Erde – Mond. Wie aber kommt es, dass die Astronauten von Apollo 11 auf ihrem gesamten Weg zum Mond bis auf die Start- und Landephase ständig gewichtslos waren?

Hier unterlief Jules Vernes ein kleiner, aber ungeheuer wichtiger Denkfehler, der zur dritten Möglichkeit, Gewichtslosigkeit zu erzeugen, überleitet: dem Freien Fall.

Zur Veranschaulichung stelle man sich eine Person in einem Aufzug vor, die auf einer Waage stehe. Wenn nun der Aufzug nach oben mit der Beschleunigung a_{Aufzug} beschleunigt wird, addiert sich zu der auf der Waage gemessenen Gewichtskraft auf Grund der Trägheit der Masse der Person noch eine Kraftkomponente hinzu. Anders gesagt, muss die Waage nun nicht mehr nur das Gewicht der Person halten, sondern die Person auch noch beschleunigen, indem sie zwischen dem seinerseits beschleunigenden Aufzug und der ruhenden Person vermittelt. Die Waage wirkt also zusätzlich mit der Kraft $F = m \cdot a_{\text{Aufzug}}$ auf die Person, welche ihrerseits wegen des Wechselwirkungssatzes mit der betragsgleichen Kraft zusätzlich auf die Waage drückt.

Insgesamt misst man also auf der Waage ein höheres Gewicht $F_{G^*} = m \cdot g + m \cdot a_{\text{Aufzug}}$.

Aus der selben Überlegung lässt sich schließen, dass man auf der Waage bei nach unten beschleunigendem Aufzug ein geringeres Gewicht misst, also $F_{G^*} = m \cdot g - m \cdot a_{\text{Aufzug}}$.

Lässt man den Aufzug frei fallen, also $a_{\text{Aufzug}} = g$, so misst man

$$F_{G^*} = m \cdot g - m \cdot a_{\text{Aufzug}} = m \cdot g - m \cdot g = 0 \text{ und man fühlt sich schwerelos.}$$

Die Apollo 11 Astronauten waren nach Abschluss der Antriebsphase ebenso wie ihr Raumschiff nur noch der Gravitation von Erde und Mond ausgesetzt. Sie wurden also genau so stark wie das Raumschiff beschleunigt, weshalb sie während des gesamten Fluges zum Mond gewichtslos waren und eben nicht, wie Jules Verne gedacht hatte, lediglich im ersten Lagrange-Punkt L1.

Das Prinzip, dass frei fallende Körper gewichtslos sind, ist das einzige, das sich derzeit sinnvoll zur Erzeugung von Mikrogravitation einsetzen lässt, da man sich für die beiden

Erstgenannten viel zu weit von der Erde entfernen müsste. Daher soll auf das Thema „Freier Fall“ gesondert eingegangen werden.

3.2 Der Freie Fall

Als Freien Fall bezeichnet man den Zustand, in dem auf einen Körper lediglich die Schwerkraft und keine anderen mechanischen Kräfte wirken. Insbesondere erfährt ein frei fallender Körper keine der Schwerkraft entgegengesetzte Normalkraft. Dieser *echte* Freie Fall kommt aber in der Realität nicht vor. Es würde ja vorausgesetzt, dass keinerlei Reibungskräfte auftreten, man sich also im absoluten Vakuum bewegt. Daher ist es sinnvoll, auch den Freien Fall unter Berücksichtigung des Luftwiderstandes zu betrachten.

3.2.1 Freier Fall aus geringer Höhe, ohne Luftwiderstand¹⁵

Für erdnahe Vorgänge lässt sich die Schwerkraft, die auf einen Körper

wirkt zu $F = m \cdot g$; $g = G \frac{m_{Erde}}{r_{Erde}^2} = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ berechnen.

Damit gilt für die Bewegungsgleichung eines frei fallenden Körpers

$$m \cdot \ddot{r} = -m \cdot g \quad (*)$$

Zweimaliges Integrieren liefert für einen Körper, der zum Zeitpunkt $t = 0$ in der Höhe h losgelassen wird

$$r(t) = h + v_0 t - \frac{g}{2} t^2$$

die Fallzeit bis $r = 0$ beträgt

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \text{ für } v_0 = 0$$

Die Fallbeschleunigung ohne Luftwiderstand wäre $\ddot{r} = g$, und in einem so fallenden Körper könnte man ideale Gewichtslosigkeit messen.

Tatsächlich wird man aber, insbesondere in Erdnähe, den Luftwiderstand zu berücksichtigen haben.

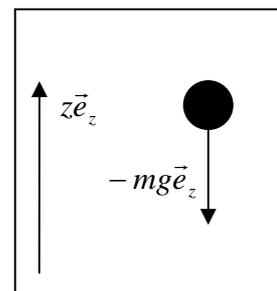


Abbildung 3: Freier Fall aus geringer Höhe, ohne Luftwiderstand

¹⁵ <http://www.ita.uni-heidelberg.de/~msb/Lectures/mechanik/mechanik.pdf> (22.06.2006)

3.2.2 Fall aus geringer Höhe mit Luftwiderstand¹⁶

Der Betrag des Luftwiderstandes ist zum Quadrat der Geschwindigkeit proportional. Die Bewegungsgleichung (*) wird damit zu:

$$m \cdot \ddot{r} = -m \cdot g + K \cdot v \cdot |v| \quad (**),$$

wobei der Luftwiderstand die Fallbewegung bremst. Für die Fallbeschleunigung erhält man:

$$\ddot{r} = \dot{v} = -g + \frac{K}{m} v^2$$

Definiert man $v_E^2 = \frac{mg}{K}$, so erhält man:

$$\frac{\dot{v}}{1 - \left(\frac{v}{v_E}\right)^2} = -g \quad (***)$$

Verwendet man die Partialbruchzerlegung

$$\frac{1}{1-x^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{1-x} + \frac{1}{1+x} \right)$$

Lässt sich (***) nach Separation der Variablen schreiben als

$$\int \frac{dv}{2} \left(\frac{1}{1 - \frac{v}{v_E}} + \frac{1}{1 + \frac{v}{v_E}} \right) = -g \int dt$$

Die Integrale lassen sich lösen zu

$$\frac{v_E}{2} \ln \frac{v_E + v}{v_E - v} = -gt + C_1$$

Aus den Randbedingungen $v(t_0) = v_0$ erhält man für die Integrationskonstante

$$C_1 = \frac{v_E}{2} \ln \frac{v_E + v_0}{v_E - v_0}$$

und für die Geschwindigkeit

$$v = -v_E \left[\frac{v_E - v_0 - (v_E + v_0) e^{-\frac{2gt}{v_E}}}{v_E - v_0 + (v_E + v_0) e^{-\frac{2gt}{v_E}}} \right]$$

Und für $t \rightarrow \infty \Rightarrow v \rightarrow -v_E$

¹⁶ <http://www.ita.uni-heidelberg.de/~msb/Lectures/mechanik/mechanik.pdf> (22.06.2006)

Definiert man vereinfachend $x = \frac{2gt}{v_E}$ und $a = \frac{v_E + v_0}{v_E - v_0}$,

so liefert nochmalige Integration:

$$r - r_0 = -\frac{v_E^2}{2g} \int \frac{1 - ae^{-x}}{1 + ae^{-x}}$$

Durch Integration erhält man

$$r - r_0 = -\frac{v_E^2}{2g} [x + 2 \ln(1 + ae^{-x})]$$

beziehungsweise nach Einsetzen der Definitionen von x und a:

$$r = r_0 - v_E t - \frac{v_E^2}{g} \ln \left\{ \frac{1}{2} \left[1 - \frac{v_0}{v_E} + \left(1 + \frac{v_0}{v_E} \right) e^{-\frac{2gt}{v_E}} \right] \right\}$$

Für $v_0 = 0$ und große Zeiten t erhält man den asymptotischen Verlauf

$$r \rightarrow r_0 - v_E t + \frac{v_E^2}{g} \ln 2$$

Für das Thema Gewichtslosigkeit interessanter ist allerdings das einfach zu beschreibende Ergebnis für die Fallbeschleunigung:

$$\ddot{r} = -g + \frac{K}{m} v^2$$

Das bedeutet, dass die Fallbeschleunigung mit zunehmender Fallzeit und –geschwindigkeit abnimmt.

Zur Veranschaulichung soll folgendes Beispiel dienen: Eine rechteckige Kiste der Größe (Länge x Breite x Höhe) 30 cm x 20 cm x 30 cm mit einer Masse von 1,5 kg soll aus der Höhe h_0 fallengelassen werden. Der Luftwiderstand berechnet sich zu:

$$F_R = \frac{1}{2} c_w \cdot A \cdot \rho_{Luft} \cdot v^2$$

Also wird K in (**) mit¹⁷

$$c_w = 1,1 \quad A = 0,06m^2 \quad \rho_{Luft} = 1,204 \frac{kg}{m^3}$$

zu

$$K = \frac{1}{2} c_w \cdot A \cdot \rho_{Luft} = 0,0397 \frac{kg}{m}$$

¹⁷ http://schoolab.tu-harburg.de/inhalte/wissen/flyer_wind.pdf (23.06.2006)

Und damit

$$v_E = \sqrt{\frac{mg}{K}} = 19,245 \frac{m}{s}$$

Wie die Graphik zeigt, macht sich der Luftwiderstand bei einem solchen fallenden Objekt sehr früh in der Beschleunigung bemerkbar.

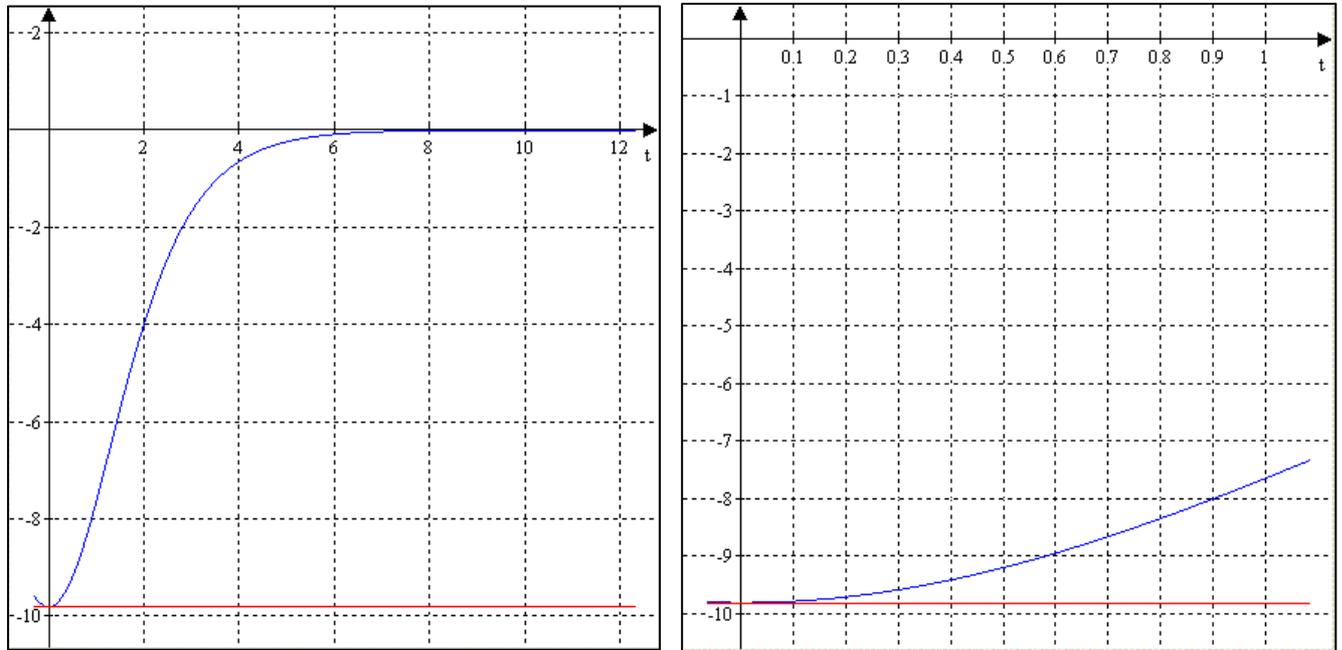


Abbildung 4: Fallbeschleunigung ohne (rot) und mit (blau) Luftwiderstand
Erstellt mit Funktionenplotter: „Mathplot“¹⁸

Bereits nach nur einer halben Sekunde wird die Kiste so stark abgebremst, dass sich ihre Fallbeschleunigung um etwa 5% gegenüber der Erdbeschleunigung verringert. Es wird sich zeigen (vgl. 5.3.4 Experiment 4: „Auftrieb“) dass man diesen Unterschied in der Beschleunigung, zumindest qualitativ, auch im Experiment feststellt.

Auch auf das zu Anfang gemachte Gedankenexperiment über eine Person in einem frei fallenden Fahrstuhl hat das Ergebnis des freien Falls mit Luftwiderstand Auswirkungen: Für die Person bedeutet das, dass sie, sobald der Luftwiderstand den Fahrstuhl bremst, stärker nach unten beschleunigt wird, als der sie umgebende Fahrstuhl. Dieser schirmt ja die Person von der umgebenden Luft ab, sie erfährt also keine Abbremsung und fällt mit unverminderter Beschleunigung.

Die Folge ist, dass man in einem real fallenden Fahrstuhl bereits nach sehr kurzer Zeit wieder eine Gewichtskraft auf einer Waage messen wird. Aus diesem Grund werden Falltürme, wie der in Bremen (siehe Kapitel 3.1), in denen möglichst gute Mikrogravitation herrschen soll, möglichst gut evakuiert.

¹⁸ <http://www.deckers-online.de/index.html> (23.06.2006)

3.2.3 Freier Fall aus großer Höhe¹⁹

Betrachtet man den Freien Fall aus großer Höhe, $h \approx R_{\text{Erde}}$, wie man ihn in der Raumfahrt findet, muss berücksichtigt werden, dass die Gravitationskraft, also auch die Fallbeschleunigung höhenabhängig ist. Die Gravitationskraft auf einen Körper im Abstand r zum Erdmittelpunkt ist gegeben zu:

$$F_G = -\frac{GMm}{r^2} \equiv -\frac{\alpha}{r^2}$$

Und seine Bewegungsgleichung lautet:

$$m\ddot{r} = -\frac{\alpha}{r^2}$$

Die Fallbeschleunigung beträgt also

$$\ddot{r} = -\frac{GM}{r^2}$$

Sie ist vom Abstand des Körpers zur Erde abhängig.

¹⁹ <http://www.ita.uni-heidelberg.de/~msb/Lectures/mechanik/mechanik.pdf> (22.06.2006)

4 Mikrogravitationsforschung

“Gravity has shaped our world, defined the way that we live, and governs the very processes of life itself.“²⁰

Die Mikrogravitationsforschung beschäftigt sich mit der Frage, wie sich Prozesse verhalten, wenn sie sich im gewichtslosen Zustand befinden. Spätestens seit am 12. April 1961 Juni Alexejewitsch Gagarin als erster Mensch die Erde verließ und unter Mikrogravitationsbedingungen im Weltraum die Erde umrundete, ist das Interesse an der Mikrogravitationsforschung nicht mehr lediglich akademischer Natur. Und so verwundert es nicht, dass die Frage, wie sich der menschliche Körper unter Gewichtslosigkeit verhält, ein zentrales Thema dieser Forschungsrichtung ist. Neben der Humanphysiologie beschäftigt sich die Mikrogravitationsforschung mit Themen aus der Biologie, der Biotechnologie, den Fluid- und Materialwissenschaften so wie der physikalischen Grundlagenforschung.

4.1 Wo findet Mikrogravitationsforschung statt?

Je nachdem, welche Anforderungen an Dauer und Qualität der Mikrogravitation gestellt werden, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, diese zu erzeugen:

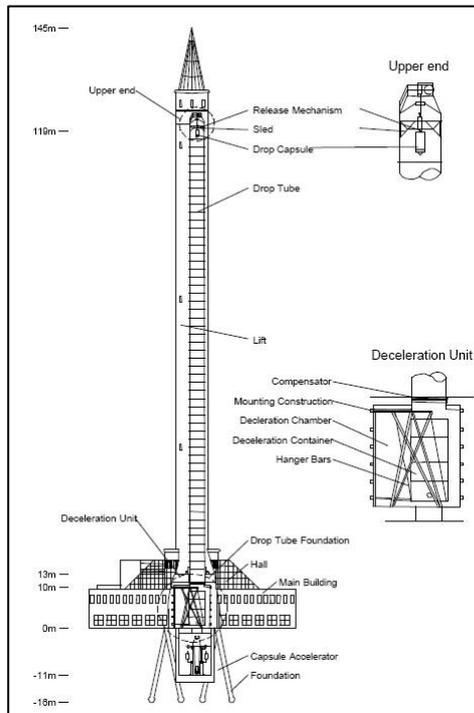


Abbildung 5: Möglichkeiten der Erzeugung von Mikrogravitation

²⁰ G. Seibert et al., 2001: A world without gravity. 1. Auflage, Norwijk NL, European Space Agency, S. 5

Die einzelnen Möglichkeiten, Mikrogravitation zu erzeugen haben ganz spezifische Vor- und Nachteile, die neben der Dauer und der Güte der Mikrogravitation auch die Kosten und den nötigen Aufwand betreffen.

4.1.1 Falltürme



Falltürme bieten momentan die kostengünstigste Möglichkeit, Mikrogravitation zu erzeugen. Im Fallturm des Zentrums für Angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation ZARM in Bremen dauert der freie Fall durch eine evakuierte Röhre 4,74 Sekunden²¹. Die so lange herrschende Gewichtlosigkeit ist, wie obige Tabelle zeigt, von hoher Qualität. Allerdings ist die Zeit relativ kurz und die Größe der Experimente, das heißt deren Ausmaße, stark beschränkt.

Die Fallkapsel fällt in einen Auffangbehälter, der mit Styroporkugeln gefüllt ist. Auf diese Art und Weise

Abbildung 6: Der Fallturm in Bremen

wird sie auf einer Strecke von nur acht Metern von gut 160 km/h auf 0 km/h abgebremst. Die dabei auftretenden Beschleunigungswerte betragen bis zu 50 g. Daher sind im Fallturm keine Mikrogravitationsexperimente am Menschen möglich. Auch andere Lebewesen überstehen diese hohe Belastung kaum.

4.1.2 Parabelflüge

Eine Möglichkeit, für längere Zeit Gewichtlosigkeit zu erzeugen sind Parabelflüge. Hierbei wird ein speziell ausgelegtes Flugzeug in einen 45° steilen Steigflug gebracht und die Triebwerksleistung soweit herunter gefahren, dass lediglich der Luftwiderstand des Flugzeuges möglichst gut ausgeglichen wird. Es befindet sich also im freien Fall und beschreibt einen Parabelbogen. Nach Durchfliegen des Scheitels wird das Flugzeug, nachdem es immer noch im freien Fall eine Geschwindigkeit von ca. 570 km/h erreicht hat, wieder

²¹ <http://www.zarm.uni-bremen.de/> (09.06.2006)

abgefangen. Bei einem typischen Parabelflug, der etwa 2,5 Stunden dauert, werden zwischen 20 und 40 Parabeln geflogen. Die Zeiten zwischen den einzelnen Parabeln können dabei gut an die für die jeweiligen Experimente erforderlichen Bedingungen angepasst werden.

Die Beschleunigungswerte beim Hochziehen und Abfangen des Flugzeuges betragen bis zu zweifacher Erdbeschleunigung. Dies führt häufig dazu, dass ungeübte Passagiere mit Magenproblemen zu kämpfen haben. Das derzeit weltgrößte Parabelflugzeug ist ein Airbus A 300. Er wird finanziert und gemanagt von CNES²² (Centre National d'Etudes Spatiales) und Novespace in Frankreich. Er bietet eine Experimentierfläche von 5m x 20m bei einer maximalen Höhe von 2,30 m.

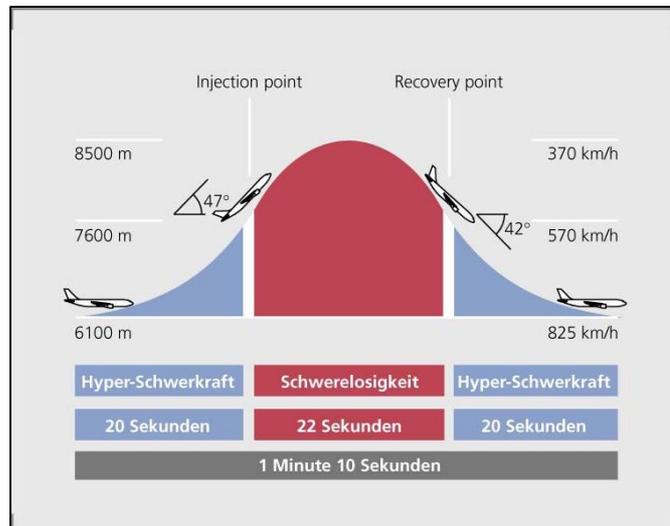


Abbildung 7: Ablauf eines Parabelfluges

Parabelflüge bieten eine relativ kostengünstige Möglichkeit, für längere Zeit Mikrogravitation zu erzeugen. Die Experimentatoren können dabei direkt in die Experimente eingreifen, da sie mit an Bord sind. Der größte Nachteil von Parabelflügen liegt in der verhältnismäßig schlechten Qualität der Mikrogravitation von nur etwa $10^{-2}g$.

4.1.3 Sounding Rockets

Mit $10^{-4}g$ um etwa zwei Größenordnungen besser sind Parabelflüge mit Forschungsraketen, so genannten *sounding rockets*. Die Raketen erreichen auf ihrem Flug Höhen von bis zu 850 km, in denen kaum atmosphärische Störeinflüsse vorkommen. Die Experimente müssen aber ein hohes Maß an Automatisierung aufweisen, da die Einflussmöglichkeiten während der bis zu 15 Minuten andauernden Gewichtlosigkeit sehr gering sind. Obwohl die Maximalmasse der Experimente, je nach verwendetem Raketensystem, auf etwa 450 kg beschränkt²³ ist, stellen *sounding rockets* für wissenschaftliche Anwendungen ein sehr beliebtes Forschungsinstrument dar. Dies liegt vor allem am günstigen Preis der Missionen.

²² http://www.novespace.fr/VEnglish/welcome_a.html (09.06.2006)

²³ G. Seibert et al., 2001: A world without gravity. 1. Auflage, Norwijk NL, European Space Agency, S. 18

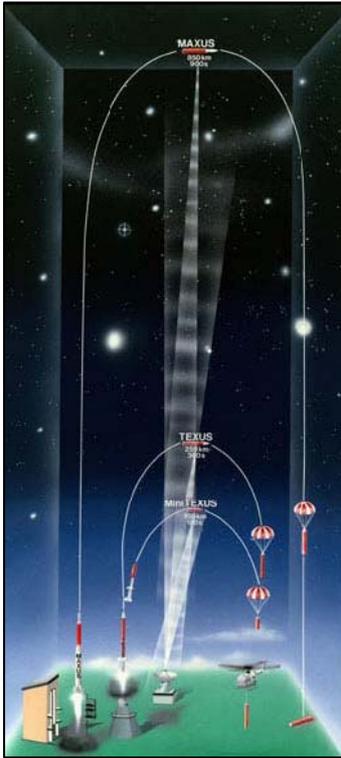


Abbildung 8: Flugbahnen von sounding rockets

Vergleichbar lange Zeiten der Mikrogravitation sind sonst nur mit bemannten Missionen im Space Shuttle oder auf der ISS möglich, die jedoch um ein Vielfaches teurer sind.

Für Studenten von Interesse ist das Forschungsprogramm REXUS²⁴ (**R**ocket-borne **E**xperiments for **U**niversity **S**tudents) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt und der schwedischen Raumfahrtagentur Swedish Space Corporation (SSC). Hierbei handelt es sich um ein jährliches Projekt, bei dem innovative studentische Experimente in einer kleinen Höhenforschungsrakete mitfliegen können.

REXUS 3 hatte bei dessen Start am 5. April 2006 sechs verschiedene, von Studenten entwickelte Experimente an Bord und erreichte eine Höhe von 95 km.

4.1.4 Bemannte Weltraummissionen

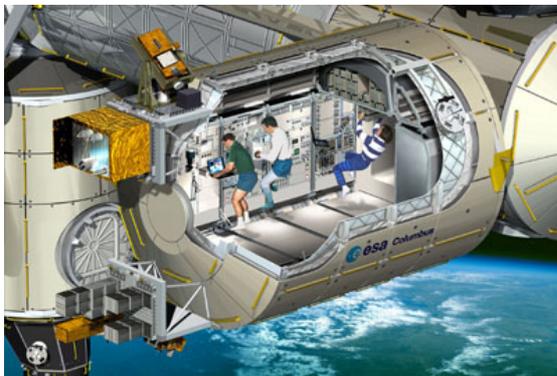


Abbildung 9: Forschungsmodul COLUMBUS

Die längsten Forschungszeiten für Mikrogravitationsexperimente bieten bemannte Weltraummissionen. Schon frühere Space Shuttle Missionen, wie das europäische Space Lab, gaben Wissenschaftlern die Möglichkeit, Mikrogravitationsforschung über Zeiträume von mehreren Tagen hinweg durchzuführen.

Heutzutage ist die Internationale Raumstation ISS die ideale Plattform für Langzeitweltraumforschung. Im europäischen Forschungsmodul COLUMBUS sollen ab 2007²⁵ mehrjährige Forschungsprojekte möglich werden.

²⁴ http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-667/1157_read-2972/ (23.05.2006)

²⁵ http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-1/86_read-3130/ (23.05.2006)

4.2 Aktuelle Fragestellungen der Mikrogravitationsforschung

Wie eingangs erwähnt, untersucht die Mikrogravitationsforschung viele verschiedene wissenschaftliche Fragestellungen. Einige zentrale Aspekte sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

4.2.1 Humanphysiologische Untersuchungen

Untersuchungen, bezüglich der Auswirkung von Gewichtlosigkeit auf den menschlichen Körper beschäftigen Mediziner bereits seit den 1930-er Jahren. Mit Hilfe von Zentrifugenexperimenten wurde versucht, von physiologischen Reaktionen auf Hypergravitation auf Reaktionen des Körpers auf Gewichtlosigkeit Rückschlüsse zu ziehen. Die Experimente zeigten, dass das Herz-Kreislauf-System sensibel auf Veränderungen der Schwerkraft reagiert.

4.2.1.1 Auswirkungen auf das Herz-Kreislaufsystem

Bei einem aufrecht stehenden Menschen befinden sich etwa 70 % des Blutvolumens unterhalb des Herzens. Dieses muss daher ständig gegen die Schwerkraft arbeiten. Unter Weltraumbedingungen, wie zum Beispiel auf der ISS, stellt man fest, dass sich die Verteilung des Blutes im Körper verändert. Während unter Mikrogravitation zum Beispiel die Blutmenge im Schienbein um 15% abnimmt, sammelt sich Blut in der Stirn, so dass das Blutvolumen dort um 7% zunimmt. Daher klagen Astronauten bereits nach wenigen Tagen im All über angeschwollene Gesichter und dünne Beine.

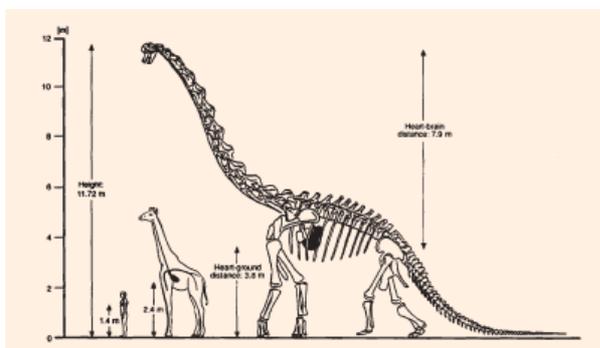


Abbildung 10: Größenvergleich von Mensch, Giraffe und Dinosaurier

Neben einer Umverteilung des Blutvolumens stellt man bei Astronauten auch eine Abnahme desselben fest. Früher wurde angenommen, dass diese Abnahme in einer vermehrten Urinausscheidung begründet sei. Genaue Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass eine solche nicht feststellbar ist. Heute nimmt man an, dass die Abnahme des Blutvolumens zum einen an einer bisher noch ungeklärten verminderten Flüssigkeitsaufnahme und zum andern an einer Flüssigkeitsabgabe vom Blut ins Gewebe liegt.

Das reduzierte Blutvolumen hat zur Folge, dass die Organe des Körpers schlechter mit Nährstoffen versorgt werden. Eine ähnliche Situation findet man bei Patienten mit Herzkrankheiten vor, die oft auch unter einer mangelhaften Blutversorgung in Folge der Herzerkrankung leiden. Man erhofft sich daher, durch Untersuchungen an völlig gesunden Astronauten bessere Heilungsmethoden für Herzpatienten zu finden.

Auch die Funktion der Lunge wird durch die Schwerkraft beeinflusst. Zu Beginn der bemannten Raumfahrt war unklar, ob Gewichtslosigkeit nicht unter Umständen Lungenödeme hervorrufen würde. Diese Annahme konnte bisher nicht bestätigt werden. Allerdings stellte man bei Langzeitastronauten eine Abnahme des Lungengewebes fest, deren Ursache noch größten Teils unklar ist. Man hofft diese Frage mit Hilfe von Langzeitstudien mit mehreren Testpersonen auf der ISS beantworten zu können und erhofft sich gleichzeitig ein besseres Verständnis der Funktionsweise der Lunge im Allgemeinen.

4.2.1.2 Auswirkungen auf den Bewegungsapparat

Vorsichtige Schätzungen nehmen an, dass etwa 50% der menschlichen Muskelmasse allein dem Widerstehen der Schwerkraft dienen. Was passiert also mit diesen Muskeln, wenn sie längere Zeit nicht unter Schwerkrafteinfluss stehen?

Untersuchungen zeigten, dass die Muskelmasse bei bettlägerigen Menschen beständig abnimmt, weil die Muskeln nicht bewegt werden. Ebenso verhält es sich auch mit den Muskeln von Astronauten bei längeren Weltraumaufenthalten. Jedoch wurde bei Weltraummissionen darüber hinausgehend eine deutliche Abnahme der Schnellkraft festgestellt, die nicht allein durch den Verlust an Muskelmasse zu erklären ist. Man nimmt an, dass die Begründung für die Abnahme der Schnellkraft²⁶ unter anderem in einer veränderten Feinmotorik zu suchen ist.

Mit speziellen Trainingsmethoden versuchen Astronauten, auch bei längeren Weltraumaufenthalten ihre körperliche Fitness zu erhalten. Hierzu wurden in der Vergangenheit verschiedenste Trainingsgeräte

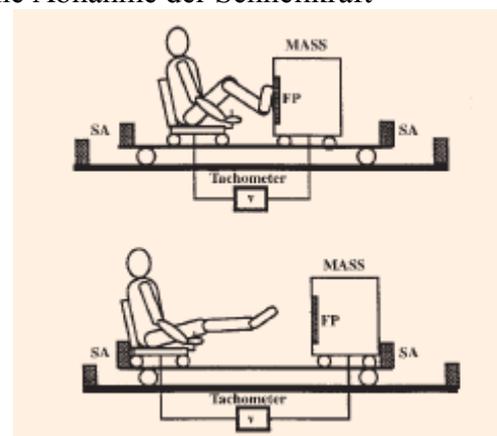


Abbildung 11: Trainingsgerät zur Steigerung der Schnellkraft

²⁶ Als Schellkraft bezeichnet man die Fähigkeit den eigenen Körper oder ein Gerät mit hoher Geschwindigkeit zu bewegen beziehungsweise Widerstände mit höchstmöglicher Kontraktionsgeschwindigkeit zu überwinden. http://www.dsg.uni-paderborn.de/_pdf/smi_material/787-0.pdf (23.06.2006)

entwickelt, die unter anderem die Schnellkraft besonders fördern.

Ein großes Problem für Astronauten stellt nach längeren Aufenthalten in Gewichtlosigkeit eine starke Abnahme der Knochenmasse dar. Bei einem gesunden Menschen werden ständig alte und abgestorbene Knochenzellen durch neue Zellen ersetzt. Kommt dieser Vorgang durch Krankheiten oder Alterungsprozesse aus dem Gleichgewicht, beginnen die Knochen an Masse zu verlieren und man spricht von Osteoporose oder Knochenschwund.

Es wurde festgestellt, dass bei Astronauten insbesondere die tragenden Knochen, wie zum Beispiel der Oberschenkelknochen, stärker unter Knochenschwund leiden als andere, etwa die der Hand. Man erhofft sich von der Klärung der Frage, wie dieser Knochenschwund zu Stande kommt, neue Erkenntnisse über den Aufbau der Knochen im Allgemeinen und insbesondere neue und bessere Heilungsmethoden für Osteoporosepatienten.

Der Astronaut Andrew Thomas beschrieb seine Eindrücke bei der Rückkehr auf die Erde nach fünf Monaten auf der Raumstation Mir folgendermaßen²⁷: „I landed lying on my back and reached for my camera – it felt amazingly heavy, like a huge fifty-pound lead dumbbell.“ Des Weiteren klagte er über Schwindelgefühle und hatte große Probleme selbstständig, ohne Hilfe zu gehen. Trotz intensiver rehabilitierender Maßnahmen konnte er auch nach einem Monat noch nicht längere Zeit laufen, ohne außer Atem zu kommen.

4.2.1.3 Auswirkungen auf die Sinneswahrnehmung

Aber auch die Sinneswahrnehmung verändert sich offenbar bei längeren Aufenthalten in Gewichtlosigkeit. So beschreiben Astronauten nach längeren Weltraumaufenthalten Probleme mit dem Gleichgewichtssinn, insbesondere bei geschlossenen Augen oder in der Dunkelheit, sowie eine veränderte visuelle Wahrnehmung. Längere Aufenthalte im All verschlechtern, wie Experimente zeigten, auch die koordinativen Fähigkeiten der Astronauten so wie deren Körperwahrnehmung.

Mediziner erhoffen sich aus den Veränderungen der Sinneswahrnehmungen genauere Rückschlüsse auf deren Funktionsweise ziehen zu können.

Insgesamt gesehen hat sich die Mikrogravitationsforschung am Menschen als wirksames und interessantes Forschungswerkzeug für verschiedenste physiologische Fragestellungen bewährt und wird auch in Zukunft, insbesondere nach Inbetriebnahme des Forschungsmoduls Columbus auf der ISS, neue und wichtige Erkenntnisse darüber liefern, wie der menschliche Körper funktioniert.

²⁷ G. Seibert et al., 2001: A world without gravity. 1. Auflage, Norwijk NL, European Space Agency, S. 93

4.2.2 Biologische Fragestellungen

Eine zentrale Frage der Mikrogravitationsforschung lautet, wie Organismen Mikrogravitation wahrnehmen. Zur Klärung dieser Frage wurden in der Vergangenheit zahlreiche biologische Experimente mit einzelnen Zellen, Zellverbänden, einfachen und komplexen Lebewesen bis hin zu den im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Versuchen mit Menschen durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass bereits einzelne Zellen sensibel für Mikrogravitation sind.

4.2.2.1 Zellreaktionen auf Mikrogravitation

Es konnte festgestellt werden, dass Astronauten nach längeren Weltraumaufenthalten weniger weiße Blutkörperchen und weniger T-Helferzellen im Blut hatten als vor dem Weltraumaufenthalt. Um zu klären, woran die Abnahme dieser für das Immunsystem essentiell wichtigen Zellen liegt, wurden verschiedene Experimente mit einzelnen Zellen unter Mikrogravitationsbedingungen durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass sich T-Helferzellen unter Gewichtlosigkeit nicht mehr vermehren. Es wird davon ausgegangen, dass Mikrogravitation die Zellfunktionen in sehr komplexer Art und Weise beeinflusst und dabei bestimmte Zellsignale verändert. Es stellt sich die Frage, wie diese Veränderungen trotz identischer chemischer Bedingungen im All und auf der Erde entstehen können. Diese Frage ist allerdings noch weitgehend unklar.

Man erwartete sich ein besseres Verständnis der intrazellulären Vorgänge, indem man diejenigen Zelltypen untersuchte, welche die stärkste Veränderung unter Gewichtlosigkeit aufweisen, nämlich die für den Knochenauf- und abbau verantwortlichen Osteoblasten beziehungsweise Osteoklasten. Wie im vorangehenden Kapitel erwähnt, verlieren Langzeitastronauten relativ schnell an Knochenmasse. Schätzungen gehen von etwa 1 -2% pro Monat aus. Als zugrunde liegenden Mechanismus nahm man an, dass unter Mikrogravitationsbedingungen weniger Knochen bildende Osteoblasten gebildet, dagegen Knochen abbauende Osteoklasten unvermindert weiterproduziert werden.

Diese Annahme konnte in Experimenten nicht bestätigt werden. Zwar wiesen Knochenzellen von Mäusen nach längerer Zeit im All eine veränderte Form und Zusammensetzung auf, derartige Veränderungen konnten hingegen an menschlichen Osteoblasten nicht nachgewiesen werden. Heutzutage wird davon ausgegangen, dass die Vermehrung der Osteoblasten unverändert bleibt und stattdessen die Erzeugung von für den Knochenaufbau

wichtigen Proteinen behindert wird. Wie dies allerdings von statten geht ist noch weitgehend unklar. Fest steht aber, dass bereits einzelne Zellen wie die oben Genannten schwerkraftsensibel sind.

4.2.2.2 Reaktionen von Pflanzen auf Gewichtslosigkeit

In Science Fiction Filmen sieht man häufig in Raumschiffen blühende Pflanzen, ja sogar Gärten. Neben der Frage, ob es möglich ist, auf einem Raumschiff einen kompletten künstlichen Lebensraum zu erzeugen, interessieren sich Forscher dafür, wie Pflanzen ihre Umwelt „wahrnehmen“ können. Man stellt fest, dass austreibende Wurzeln sehr schnell und präzise nach unten, in Richtung der Schwerkraft wachsen.



Abbildung 12: Reaktion eines Keimlings auf den Schwerereiz

Die Graphik zeigt zeitlich versetzte Aufnahmen eines austreibenden Linsensamens. Dieser trieb zuerst für 27 Stunden in einer vertikalen Ausrichtung aus

und wurde dann horizontal ausgerichtet. Bereits nach drei Stunden hatte sich die austreibende Wurzel den veränderten Gegebenheiten angepasst und ihre Richtung nach unten geändert.

In den Wurzeln von Pflanzen befinden sich Zellen, so genannte Statocyten, mit überaus empfindlichen Gravitationsrezeptoren, die den Schwerkraftreiz in ein biochemisches Signal umwandeln und an andere Zellen weitergeben. Dieser als Gravitropismus²⁸ bezeichnete Vorgang ermöglicht es einerseits den Keimlingen, möglichst schnell den Weg in die Erde zu finden, andererseits dem Trieb der Pflanze, zielgerichtet nach oben zu wachsen.

Zentrifugenexperimente unter Gewichtslosigkeit zeigten, dass Pflanzen bereits auf sehr geringe Schwerereize sensibel reagieren. Die kleinste noch wahrgenommene Schwerkraft beträgt etwa ein Tausendstel der Erdschwerkraft und bereits eine Zeit von nur 25 Sekunden reicht auf der Erde aus, um Pflanzenwurzeln in Richtung der Schwerkraft wachsen zu lassen.

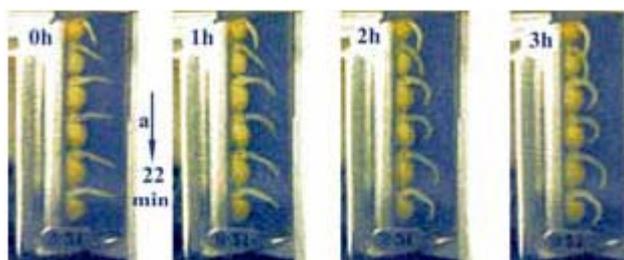


Abbildung 13: Verhalten von Keimlingen unter Mikrogravitation, nachdem sie für 22 Minuten einen Beschleunigungsreiz von 1g erfahren haben

In der nebenstehenden Bilderfolge sieht man die Entwicklung von Linsenkeimlingen, die zuerst für 22 Minuten mit 1g in Richtung des Vektors a beschleunigt wurden und dann unter Mikrogravitationsbedingungen weiter

²⁸ <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/d32/32c.htm> (09.06.2006)

wuchsen. Man kann deutlich erkennen, dass die Wurzeln den vermeintlichen Schwerereiz wahrgenommen haben. In Ermangelung eines weiteren Reizes schossen die Wurzeln aber sozusagen übers Ziel hinaus und begannen sich nach innen zu krümmen.

Dieser Vorgang wird verständlich, wenn man sich klar macht, wie die Schwerewahrnehmung funktioniert. In den Statocysten befinden sich bestimmte Zellbausteine, so genannte Statolithen, die eine höhere Dichte als die sie umgebenden Zellinhalte haben und daher unter Schwerkrafteinfluss sedimentieren. Unter Mikrogravitation findet keine Sedimentation mehr statt, sondern die Statolithen bleiben an dem Ort, an dem sie sich abgelagert haben und die Wurzel folgt diesem vermeintlichen Schwerereiz. Bleibt die Frage, ob eine Pflanze in der Lage ist unter Mikrogravitation zu wachsen.

Es wurde festgestellt, dass Mikrogravitation auf die Keimung einer Pflanze wenig Einfluss hat. Zwar hat die austreibende Wurzel wie oben beschrieben keinen Anhaltspunkt, in welche Richtung sie wachsen soll, es stellte sich aber heraus, dass die Orientierung in den meisten Fällen vom Samen weggerichtet ist. Allerdings wurde festgestellt, dass Wurzeln, je nach Entwicklungsstadium, unter Mikrogravitation und unter normaler Schwerkraft unterschiedlich schnell wachsen.

Langzeituntersuchungen auf der russischen Raumstation Salyut-7 zeigten, dass Pflanzen unter Mikrogravitation schneller wuchsen als bei Erdschwerkraft. Dazu wurden Kontrollpflanzen in einer Zentrifuge mit 1g beschleunigt, wohingegen die anderen unter Mikrogravitation um 8% bis 16% schneller wuchsen. Allerdings muss erwähnt werden, dass beide Gruppen im Weltall langsamer wuchsen als Vergleichsgruppen auf der Erde. Wie spätere Experimente zeigten, war dieses reduzierte Wachstum auf die Luftqualität und insbesondere auf eine zu hohe Ethylenkonzentration zurückzuführen.

Die verwendeten Pflanzen waren allerdings allesamt bereits mehrere Tage auf der Erde gewachsen. In der Tat ist es, trotz großer Bemühungen, bis heute noch nicht gelungen, einen kompletten Wachstumszyklus einer Pflanze, von der Aussaat bis zur Ernte außerhalb der Erde zu beobachten, da alle im Weltraum gezüchteten Keimlinge nach kurzer Zeit wieder eingingen.

Gerade die Frage, wie es möglich ist, Pflanzen unter Mikrogravitationsbedingungen aufwachsen zu lassen ist für die zukünftige bemannte Raumfahrt von sehr großem Interesse. Daher werden sich verschiedene Forschungsprogramme auf der ISS damit beschäftigen, was gute „Weltraumgärtner“ ausmachen könnte.

4.2.3 Physikalisch- technische Forschungsinhalte

Mikrogravitation bietet für viele physikalische Forschungsbereiche überaus interessante Bedingungen, da vielfach schwerkraftabhängige Störungen sensible Prozesse oder deren Beobachtung beeinträchtigen. Auf einige derartige physikalische Prozesse soll im Folgenden eingegangen werden.

4.2.3.1 Kristallwachstum

Für Biologen und Chemiker ist es von größter Bedeutung, die Struktur von großen Molekülen möglichst exakt zu kennen. Hierzu stellt häufig die Röntgenbeugung an Kristallen dieser Molekülen die einzig mögliche Methode dar. Umso wichtiger ist es, möglichst gute und reine Kristalle zu erzeugen. Ein großes Problem bei der Kristallisation von Flüssigkeiten stellen Auftriebseffekte in Folge von Dichteunterschieden dar. Molekularbiologen erhoffen sich daher unter Gewichtslosigkeit, also ohne störenden Auftrieb, bessere Kristalle erzeugen zu können als auf der Erde. Allerdings haben aktuelle Experimente gezeigt, dass bereits kleine Störungen der Mikrogravitation, wie sie zum Beispiel bei Steuermanövern vorkommen, die Kristallisation von Makromolekülen, wie Proteinen, beeinflusst. Daher waren Mikrogravitationsexperimente in diesem Bereich bisher noch nicht so erfolgreich, wie erhofft. Die gewonnenen Daten lassen aber hoffen, dass zukünftige Experimente mit verbesserten Anordnungen zu besseren Ergebnissen führen werden.



Experimente mit Einzelkristallen unter Mikrogravitation werden bereits seit über 25 Jahren²⁹ durchgeführt. An erster Stelle stehen hier Experimente mit Halbleitern wie Silizium und Germanium, Materialien, die im Wesentlichen in Halbleiterbauelementen eingesetzt werden. Allerdings kann für solche Anwendungen nur hochreines, so genanntes Halbleitersilizium verwendet werden, ein Stoff, der in natürlichen Vorkommen nicht existiert. Um Halbleitersilizium zu erzeugen, wird ein hochreiner monokristalliner Silizium-Impfkristall in geschmolzenes Silizium gebracht und unter Drehen aus der Schmelze herausgezogen. Bei diesem Vorgang wächst reines

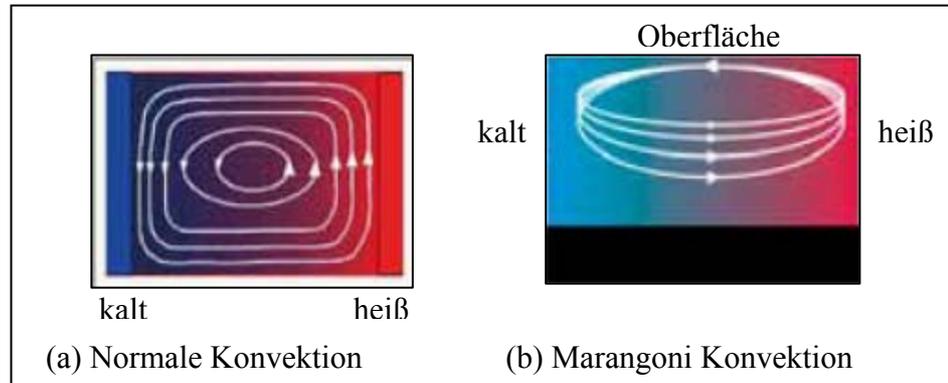
Abbildung 14: Hochreiner monokristallines Silizium auf dem Impfkristall und Siliziumkristall

²⁹ G. Seibert et al., 2001: A world without gravity. 1. Auflage, Norwijk NL, European Space Agency, S. 174

Verunreinigungen bleiben in der Schmelze zurück.

Jedoch sind auch die derart erstellten Kristalle nicht völlig frei von Unreinheiten und ebenso wenig sind sie völlig gleichförmige Kristalle. Allerdings fordert die rapide wachsende Computerchipindustrie immer bessere Siliziumkristalle, um noch kleinere Baugrößen bei höherer Leistung zu verwirklichen.

Eine wichtige Störgröße bei der Kristallisation stellen konvektive Bewegungen in der Schmelze auf Grund von



Dichteunterschieden **Abbildung 15: Normale und Marangoni Konvektion**

(a), aber auch aufgrund der Oberflächenspannung (b) dar. Die im letztgenannten Fall auftretende Konvektion wird als Marangoni Konvektion bezeichnet.

Da diese, zumindest unter normalen irdischen Schwerebedingungen, viel weniger ins Gewicht fällt als die Konvektion auf Grund von Dichteunterschieden, war lange unklar, wie groß ihr Einfluss auf das Kristallwachstum tatsächlich ist. Verständlicherweise beschäftigten sich daher mehrere Mikrogravitationsexperimente mit dem Einfluss der Marangoni Konvektion auf die Kristallisation von Materialien.

Weitere Experimente behandelten Themen wie zum Beispiel die maximale Kristallgröße oder den Einfluss von Magnetfeldern auf das kristalline Wachstum. Während zu Beginn der Forschungsarbeiten noch manche Wissenschaftler auf eine Art extraterrestrische Kristallfabrik hofften, haben sich solche Ideen inzwischen als unrentabel herausgestellt. Der Sinn von Mikrogravitationsexperimenten mit Kristallen ist auch hier eher in der Grundlagenforschung zu sehen, wobei durch Ausschalten einer sonst sehr wichtigen Störgröße, nämlich der Schwerebeschleunigung, ein besserer Einblick in die zugrunde liegenden Zusammenhänge, wie zum Beispiel im Falle der Marangoni Konvektion ermöglicht wird.

4.2.3.2 Schmelz- und Gießverfahren

Wie das Kristallwachstum beeinflussen auftriebsbedingte Konvektionsströmungen auch alle Metallgussverfahren. Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften werden bei

gegossenen Körpern, wie zum Beispiel Motoren, nicht nur von deren Form und chemischen Zusammensetzung beeinflusst, sondern auch davon, wie die Schmelze in der Gussform erstarrt.

Die hierbei auftretenden Fehler können von Größenordnungen im atomaren Bereich, zum Beispiel bei feinsten Verschmutzungen des Rohmaterials, bis zu einigen Metern, etwa beim Auskühlen von großen Stahlträgern reichen. Eine genaue Kenntnis dieser Vorgänge ist für die Programmierung entsprechender Simulationen überaus wichtig.

Allerdings treten in abkühlenden Materialien hohe Temperaturgradienten mit entsprechend starken Auftriebseffekten auf, welche meist andere Vorgänge, insbesondere die im atomaren Bereich, überschatten und somit die Ermittlung exakter Werte, wie zum Beispiel Materialkonstanten, unmöglich machen.

Da aber die Qualität von Simulationsverfahren in sehr hohem Maße von den zu Grunde liegenden Konstanten abhängt, ist es sinnvoll, das Verhalten von geschmolzenen Materialien unter Ausschluss möglichst vieler Störgrößen zu erforschen.

Hier bietet die Mikrogravitationsforschung eine zentrale Möglichkeit, die Vorgänge unter fast vollständigem Ausschluss von Auftriebseffekten zu beobachten. Daher wurden in der Vergangenheit viele Mikrogravitationsexperimente, die sich mit dem Erstarren von geschmolzenen Materialien befassten, durchgeführt. Neben der drastischen Reduktion von Auftriebseffekten, bieten diese zusätzlich noch den Vorteil, die Metalle ohne einen sie umgebenden Behälter schmelzen und somit viel gleichmäßiger durch Strahlung erhitzen zu können.

Man erhofft sich auf diese Weise die überaus komplexen Schmelz- und Erstarrungsvorgänge besser zu verstehen und mit Hilfe präziserer Messungen Simulationen zu optimieren. So kann die Mikrogravitationsforschung, obwohl es in absehbarer Zeit nicht möglich sein dürfte, extraterrestrisch unter Gewichtlosigkeit im industriellen Maßstab zu produzieren, dennoch für industrielle Anwendungen hilfreich und lukrativ sein.

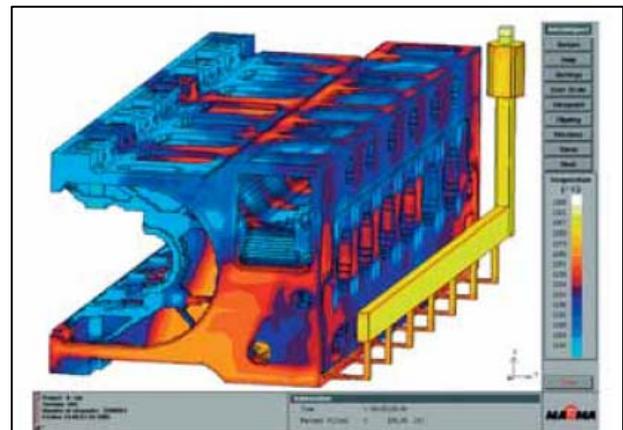
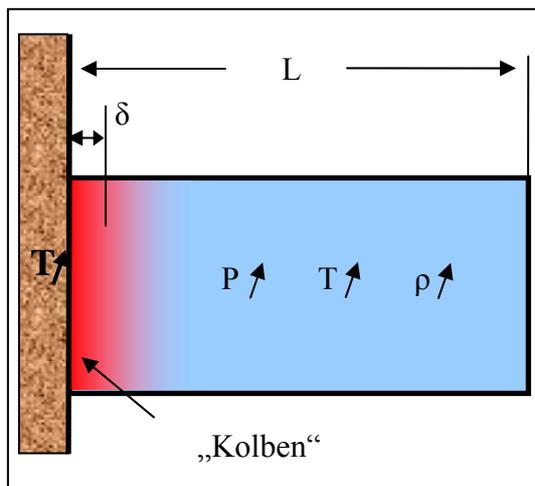


Abbildung 16: Simulation der Temperaturverteilung beim Guss eines Motorblocks

4.2.3.3 Überkritische Flüssigkeiten

Neben solchen industriellen Anwendungen ist die Mikrogravitationsforschung aber auch für physikalische Grundlagenexperimente von Bedeutung. So wurde zum Beispiel mit ihrer Hilfe ein völlig neuer Weg der Wärmeleitung, der so genannte Kolbeneffekt entdeckt. Dieser tritt unter Mikrogravitation bei überkritischen Flüssigkeiten auf, bei Flüssigkeiten also, die sich jenseits des Kritischen Punktes im Phasenübergang zwischen flüssig und gasförmig befinden. Man stellt fest, dass überkritische Flüssigkeiten sehr kompressibel sind und sich gleichzeitig sehr schnell ausdehnen können.

Erhitzt man nun eine überkritische Flüssigkeit, die in einem Behälter eingeschlossen ist, auf einer Seite des Behälters sehr stark, so bildet sich dort eine zusammenhängende heiße Schicht der Flüssigkeit, die sich schnell ausdehnt und dabei die restliche Flüssigkeit wie ein Kolben zusammenpresst und adiabatisch erwärmt. Das Ergebnis ist ein Flüssigkeitsgemisch, das an der Stelle, an der das Behältnis erwärmt wird, einen hohen Temperaturgradienten und sonst eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung aufweist.



Mechanismus des Kolbeneffektes: Eine dünne heiße Grenzschicht dehnt sich rasch aus und komprimiert die übrige Flüssigkeit. Der Temperaturgradient ist nahe der erhitzten Grenzschicht groß, die übrige Flüssigkeit wird homogen erhitzt. Diese Erhitzung breitet sich mit Schallgeschwindigkeit aus.

Abbildung 17: Der Kolbeneffekt

Da unter normalen Schwerkraftbedingungen Auftriebseffekte den Kolbeneffekt überschatten, wurde er erst unter Mikrogravitationsbedingungen entdeckt.

4.2.3.4 Verbrennungsvorgänge

Völlig anders als unter Schwerebedingungen verhalten sich Verbrennungsvorgänge unter Gewichtlosigkeit. Während auf der Erde unter normalen Schwerebedingungen die hohen Dichteunterschiede von heißen und kalten Gasen zu starken Auftriebseffekten führen, findet man solche unter Mikrogravitation nicht. An Flammen ohne Auftriebseinfluss kann man zum Beispiel untersuchen, ab welchem exakten Mischungsverhältnis ein Gasgemisch entflammbar ist. Dies ist unter Schwerebedingungen nicht möglich, da wegen der Auftriebseinflüsse keine kontrollierbar exakten Mischungsverhältnisse erzeugt werden können.

Die derart gewonnenen Kenntnisse ermöglichen bessere Simulationsverfahren und letzten Endes effizientere Verbrennungsvorgänge mit allen Vorteilen, wie geringerem Schadstoffausstoß und geringerem Treibstoffverbrauch.

Die Möglichkeit, auf die Gasgemische in Flammen genau Einfluss nehmen zu können, kann auch wirtschaftliche Vorteile produzieren. Dies kann man am Beispiel der Herstellung von Turbinenblättern sehen.

In Gasturbinen, wie sie vor allem in Flugzeugen eingesetzt werden, hat man oft mit Schwingungsproblemen, die von periodisch auftretenden Verbrennungsstörungen herrühren, zu kämpfen. Diese Schwingungen führen zum einen zu einem höheren Lärmpegel des Triebwerks, können aber zum anderen, im Resonanzfall, die Turbine sogar zerstören. Eine wichtige, noch offene Frage lautet, ob Wechselwirkungen zwischen der Flamme und Verwirbelungen an den Turbinenblättern die Quelle oder zumindest Verstärker dieser Schwingungen sind.

Daher wird erforscht, wie eine schwache, exakt gemischte Flamme mit unterschiedlich starken, genau definierten Wirbeln wechselwirkt. Da aber homogen gemischte Flammen unter normalen Schwerebedingungen, wie oben erwähnt, nicht vorkommen, stellt eine Mikrogravitationsumgebung die einzige Möglichkeit dar, diese komplexen Wechselwirkungen zu erforschen.

Aufwändige, langjährige Untersuchungen der NASA in dieser Richtung haben dazu geführt, dass amerikanische Unternehmen bei der Herstellung von Turbinenblättern bis heute fast eine Monopolstellung einnehmen.

4.2.3.5 Atome unter Mikrogravitation

Seit Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji und William D. Phillips 1997 den Nobelpreis für Physik für die Entwicklung der Laserkühlung erhielten³⁰, hat sich diese Technologie als essentiell für aktuelle Fragen der Atomphysik erwiesen. Heutzutage ist es möglich, Bose-Einstein-Kondensate zu erzeugen, deren Atome Geschwindigkeiten von lediglich 30 $\mu\text{m/s}$ aufweisen. Wenn man jedoch die hierzu

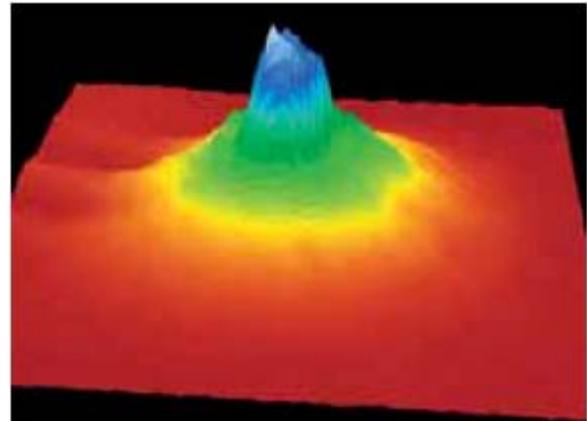


Abbildung 18: Geschwindigkeitsverteilung eines Bose-Einstein-Kondensats aus Rubidium Atomen

verwendete Magnetooptische Falle ausschaltet, werden die Atome auf Grund der Erdbeschleunigung in nur 1/10 Sekunde auf eine Geschwindigkeit von 1 m/s beschleunigt, was einer Steigerung um den Faktor 33.000 entspricht!

Unter Mikrogravitation ist es hingegen möglich, bei ausgeschalteter Falle, die gekühlten Atome für bis zu zehn Sekunden in einem beobachtbaren Bereich zu halten.

Eine weitere Anwendung „gewichtloser“ Atome stellen Cäsiumfontänen beziehungsweise Atomuhren dar. Bei Cäsium-Atomuhren durchlaufen im Grundzustand befindliche Cäsiumatome ein Mikrowellenfeld, dessen Frequenz

ungefähr der eines Hyperfeinstrukturüberganges des Cäsiumatoms entspricht. Nach Durchlaufen des Feldes wird die Anzahl der Cäsiumatome, die ihren Zustand gewechselt haben gezählt und das Mikrowellenfeld so nachjustiert, dass ihre Anzahl maximal wird. Die Frequenz des Mikrowellenfeldes beträgt nun genau 9 192 631 770 Hz und dient als Frequenznormale der Atomuhr. Jedoch ist die Genauigkeit, mit der die Frequenz des Mikrowellenfeldes der des Cäsiumüberganges entspricht, zum einen von der Geschwindigkeit der Cäsiumatome und zum anderen von deren Verweildauer im Mikrowellenfeld

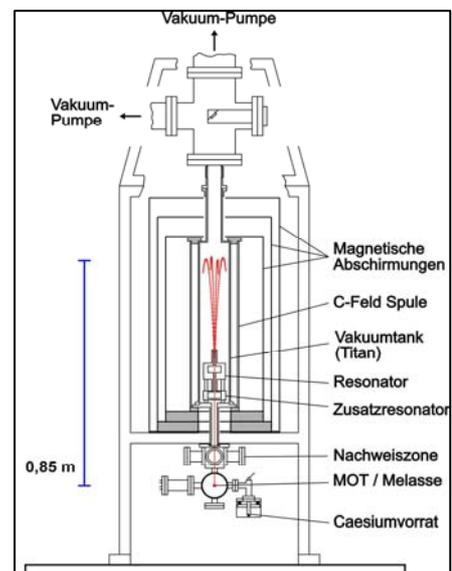


Abbildung 19: Aufbau der CSF1 der PTB in Braunschweig

anhängig. Ideal wäre es, wenn sich die Atome mit sehr geringer Geschwindigkeit möglichst lange durch das Feld bewegen würden. Da sie sich aber auf der Erde in deren

³⁰ <http://nobelprize.org/physics/laureates/1997/press.html> (09.06.2006)

Schwerkrafteinfluss befinden, wird dieses Ideal am besten mit so genannten Cäsiumfontänen realisiert. In diesen werden lasergekühlte Cäsiumatome mit geringer Geschwindigkeit nach oben beschleunigt, durchlaufen das Mikrowellenfeld und werden gleichzeitig von der Schwerkraft abgebremst, um schließlich wieder nach unten zu fallen und das Feld ein zweites mal zu durchlaufen.³¹ Die effektive Verweildauer der Atome im Feld beträgt somit etwa eine Sekunde.

Eine wesentlich längere Verweildauer erhofft man sich von Atomuhren im Weltall, bei denen die Atome dank Mikrogravitation nicht so schnell beziehungsweise fast gar nicht fallen, und deren Geschwindigkeit somit fast völlig von der Qualität der Laserkühlung abhängt. Man erwartet auf diese Weise eine Verbesserung der Uhrengenauigkeit um einen Faktor 10 zu erreichen. Diese hohe Genauigkeit könnte zum Beispiel der genaueren Untersuchung der relativistischen Einflüsse auf eine erdenferne bewegte Uhr dienen und somit eine große Bereicherung der Physikalischen Grundlagenforschung darstellen.

³¹ http://www.ptb.de/de/org/4/44/441/_index.htm (09.06.2006)

5 Mikrogravitation im Physikunterricht – der Minifallturm

Obwohl die Mikrogravitationsforschung, wie im vorhergehenden Kapitel gezeigt, ein sehr interessantes, vielseitiges und lebendiges physikalisches Forschungsgebiet ist, kommt das Thema „Gewichtslosigkeit“ im Physikunterricht meist nicht, oder nur theoretisch vor. Der Grund hierfür ist wohl nicht in einem mangelnden Interesse seitens der Schüler, sondern eher in der Frage der Vermittelbarkeit zu suchen, da geeignete Experimentiermaterialien praktisch nicht existieren. Die zentrale Aufgabe dieser Zulassungsarbeit bestand daher darin, zu untersuchen, ob es mit vergleichsweise geringem finanziellem Aufwand möglich ist, im Schulunterricht Mikrogravitationsexperimente durchzuführen.

5.1 Entstehungsgeschichte

Die Idee, einen schulgerechten Minifallturm zu bauen, mit dessen Hilfe Mikrogravitationsexperimente im Unterricht durchführbar wären, geht auf ein Gespräch mit Herrn StR. Hopf zurück. In diesem Gespräch zeigte mir Herr Hopf eine Lehreranleitung der NASA³², in der ein solcher Fallturm, beziehungsweise die darin durchzuführenden Experimente vorgestellt wurden. Diese, von der NASA entwickelte Experimentiereinheit besteht im Wesentlichen aus einer Kiste, in der physikalische Experimente mit Hilfe einer Videokamera beobachtet werden können. Lässt man diese Kiste aus zwei Metern Höhe fallen, so kann man damit für etwas mehr als eine halbe Sekunde Mikrogravitationsforschung betreiben. Leider ist diese, allem Anschein nach sehr durchdachte Fallbox in Deutschland nicht erhältlich.

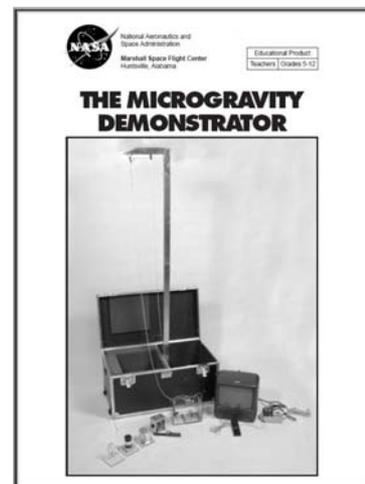


Abbildung 20:
Lehreranleitung der Nasa

³² http://neurolab.nasa.gov/er/sch/Microgravity_Demonstrator.pdf (09.06.2006)

Die einzige Alternative zum Eigenbau stellt derzeit ein von einer Firma in Bremen vertriebener Minifallturm dar³³. Im Rahmen eines Besuches im DLR School_Lab in Köln, hatte ich die Gelegenheit, ein Exemplar dieses Minifallturms zu besichtigen und auszuprobieren. Der Fallturm besteht durch einen sehr gut durchdachten, professionellen und stabilen Aufbau. Auch die Ergebnisse der Experimente können sich sehen lassen. Das kann man allerdings leider auch vom stolzen Preis des Gerätes behaupten, der mit deutlich über €10.000,- jenseits dessen liegt, was sich die meisten Schulen leisten können.



Abbildung 21: Der käufliche Minifallturm im DLR School_Lab in Köln

Der im Rahmen dieser Zulassungsarbeit entwickelte Fallturm ist hingegen so konzipiert, dass sich die Kosten in der einfachsten Ausführung auf unter €100,- belaufen. Im Folgenden wird der prinzipielle Aufbau der Fallbox erklärt. Eine genaue Bauanleitung mit Stückliste und Bezugsquellen befindet sich im Anhang.

5.2 Aufbau

Der zentrale Bestandteil des Minifallturms ist die Fallbox. In ihr finden die Experimente statt und werden mittels einer Mini-Funk-Kamera übertragen und aufgezeichnet. Anfängliche Versuche, die Fallbox aus einem Holzrahmen und durchsichtigen Kunststoffplatten selbst zu bauen schlugen leider aus Stabilitätsgründen fehl. Eine solche

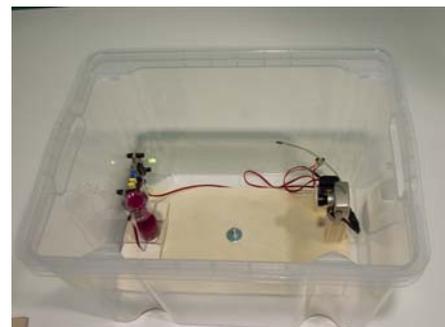


Abbildung 22: Die Fallbox

Box hätte den Vorteil gehabt, dass man ihre Größe exakt an die, für die Experimente notwendigen Gegebenheiten hätte anpassen und somit minimieren können. Das selbst gesteckte Ziel, die Fallbox, nebst allem Zubehör in einer einzigen, nicht zu großen und U-Bahn-tauglichen Kiste transportieren zu können, wurde aber dennoch erreicht.

Als Box dient nun eine Aufbewahrungskiste aus Kunststoff aus dem Baumarkt, die im Vergleich zur selbst gebauten Kiste wesentlich robuster ist. Die Experimentierplattform ist

³³ www.minifallturm.de (09.06.2006)

eine, mit Kiefernleisten verstärkte Sperrholzplatte. Auf dieser sind zum einen die Minikamera und zum anderen, herausnehmbar, die einzelnen Experimentaufbauten befestigt. Um bei der Landung der Fallbox eventuell auftretende harte Stöße abzufedern, ist die Kamera auf Gummischieben gelagert.

Die Kamera selbst wurde bei einer Online-Auktion (ebay) zum Preis von nur € 50,- inklusive Funkempfänger und zwei Netzgeräten erstanden. Die Qualität der Farbvideoaufnahmen ist für alle hier gestellten Anforderungen völlig ausreichend. Neben dem Einsatz in der Fallbox, lässt sich eine so kleine Funkkamera noch in vielen anderen Experimenten des Physikunterrichts einsetzen, was den Anschaffungspreis auf jeden Fall rechtfertigen dürfte.

Die Versuchsaufbauten selbst sind auf Sperrholzbrettchen befestigt, die in eine entsprechende Halterung auf der Experimentierplattform geschoben werden können. Somit ist es möglich, die einzelnen Aufbauten schnell und ohne Werkzeug auszutauschen.

Verschlossen wird die Box mit einem Deckel aus stabilem Flugzeugsperrholz, in dessen Mitte eine Eisenplatte angeschraubt ist. Diese Eisenplatte dient der Befestigung der Box mittels eines Elektromagneten.

Zum Schutz vor der beim Experiment „Verbrennung“ entstehenden Hitze ist an der Innenseite des Deckels auf Höhe der Experimentaufbauten noch ein Kupferbeschlag angebracht.

Geschlossen wird er Deckel mit einer Verriegelung aus dem Modellbaubedarf.

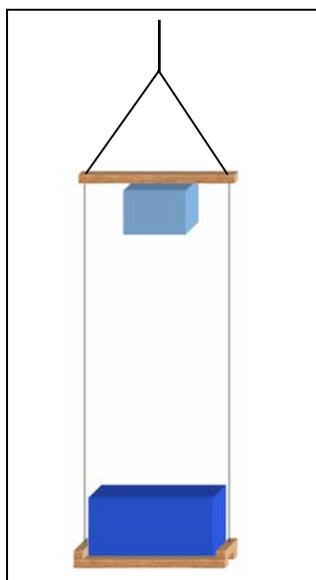


Abbildung 23: Ein möglicher Fallturmaufbau

Als Fallturm kann prinzipiell jede etwa zwei Meter hohe Erhebung dienen, an der sich der Elektromagnet befestigen lässt. Versuche mit schulüblichem Stativmaterial waren zwar erfolgreich, aber bei einer Aufbauzeit von etwa einer halben Stunde, nur für den Turm, nicht sonderlich praktikabel.

Gute Erfahrungen wurden mit industriellen Werbeaufstellern gemacht, die jedoch weder sonderlich einfach noch kostengünstig zu erwerben sind. Daher wird als „Turm“ inzwischen eine einfache, an einem Haken an der Zimmerdecke zu befestigende Holzkonstruktion verwendet.

Die Fallbox fällt in eine Auffangkiste aus Kunststoff, die

gleichzeitig als Transport- und Aufbewahrungsbehälter dient. Um die Box sanft und sicher abzubremsen wird ein Fangtuch

verwendet. Dieses wird mit vier Seilen an der Auffangbox straff gespannt. Fällt nun die Fallbox in das Fangtuch, so können die daran befestigten Seile unter Reibung durch Löcher in der Auffangbox rutschen und somit die Fallbox abbremsen.

An Stelle eines solchen Auffangtuches kann man aber auch einfach ein Kissen verwenden, das dann aber beim Transport etwas mehr Platz beansprucht.

Als Befestigung der Fallbox mit dem „Turm“ wird ein Elektromagnet verwendet. Dieser hat gegenüber mechanischen Befestigungsmethoden den Vorteil, dass man weder die Fallbox noch den Turm berühren muss, um den freien Fall auszulösen und somit die

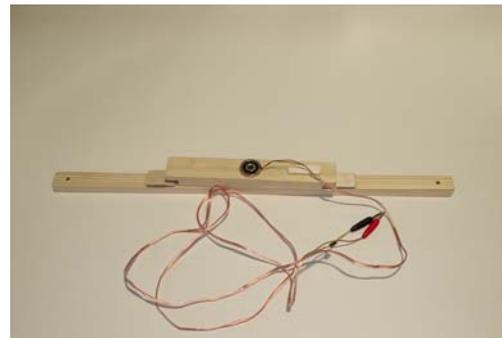


Abbildung 24: Aufhängung mit Elektromagnet

Messergebnisse nicht durch Fremdeinwirkungen verfälscht. Der Magnet wurde, wie die Kamera, bei einer Online-Auktion gekauft, in der Stückliste im Anhang befindet sich aber eine zuverlässige Quelle für verwendbare Elektromagneten.

Schon früh im Entwicklungsstadium der Fallbox zeigte sich, dass es sinnvoll sei, den Beginn des freien Falls auf irgendeine Art und Weise sichtbar anzuzeigen. Hierzu wurde eine, auf einem Beschleunigungssensor basierende Schaltung entwickelt, die mit einer roten Leuchtdiode exakt anzeigt, wenn die Fallbox nach oben oder unten beschleunigt wird und mit einer grünen, wenn sie ruht. Somit kann man bei der Auswertung der Experimente ganz genau erkennen, wann der freie Fall und damit die Beobachtungszeit begonnen hat. Ein Schaltplan, sowie eine Erklärung der Funktionsweise der Schaltung befinden sich im Anhang.

Als einfache, mechanische Alternative wäre es auch denkbar, zwei, auf einem Holzstab gegenpolig aufgefädelt Ringmagneten zu verwenden. Wenn die Fallbox ruht, zieht die



Abbildung 25: Magnetgravimeter

Schwerkraft die Magneten gegen deren Abstoßung zusammen, fällt die Box, können sich die Magneten voneinander entfernen und somit ebenfalls den Beginn des freien Falls anzeigen. Als Nachteil für diese einfache mechanische Lösung muss man die prinzipiell bei mechanischen Systemen auftretende Trägheit, sowie deren Anfälligkeit gegen Beschädigungen sehen.

Ein weiterer Nachteil einer solchen mechanischen „Freifallanzeige“ ist, dass sie, für die Schüler sichtbar, auf einem Prinzip beruht, das die Fallbox ja gerade zeigen soll: der Gewichtslosigkeit im freien Fall.

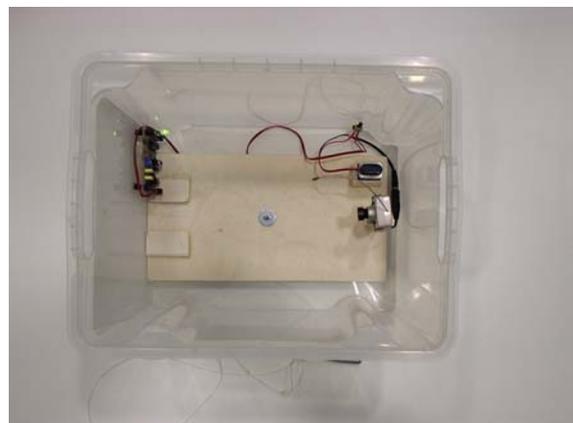
Um zu erklären, wie diese Anzeige funktioniert, müsste man also ein ganz zentrales Versuchsergebnis, nämlich gerade, dass man im Freien Fall gewichtslos ist, bereits vorweg nehmen. Dass es Beschleunigungssensoren, wie sie in der elektronischen Schaltung verwendet werden, gibt, die eine Geschwindigkeitsänderung wahrnehmen und melden können, ist hingegen, in Zeiten von Antiblockiersystemen und elektronischen Stabilitätsprogrammen hinlänglich bekannt.

5.3 Die Experimente

Eine heikle Frage zu Beginn der Arbeit am Minifallturm war, ob die kurze Beobachtungszeit von nur etwas mehr als 0,6 Sekunden ausreichen würde, um Mikrogravitationsphänomene sichtbar zu machen. Zwar schienen einige Experimente, die im anfangs erwähnten Minifallturm der NASA und dem aus Bremen eingesetzt werden, zu funktionieren. Ob das aber im vorliegenden Fall auch so realisierbar wäre, dass die Ergebnisse für die Schüler gut sichtbar wären, war noch vollkommen unklar. Auf jeden Fall vermieden werden sollte, dass die Experimentergebnisse nur sichtbar wären, wenn sie schon im Vorfeld bekannt waren. Daher entschied ich mich, den Minifallturm mit einer ausführlichen Anleitung zu versehen und die experimentierenden Schüler größtenteils selbstständig daran arbeiten zu lassen. Dadurch werden keine Experimentergebnisse vorweggenommen. Im Folgenden sollen die verschiedenen mit Schülergruppen getesteten Experimente vorgestellt werden.

5.3.1 Experiment 1: „Systemcheck“

Aufgabe dieses Experimentes ist es, die Schüler mit dem Versuchsaufbau und dem Ablauf, insbesondere der Computerauswertung vertraut zu machen. Die Fallbox ist daher bis auf die drei fest eingebauten Komponenten Kamera, Batterie und Mikrogravitationsampel leer. Die Auswertung des Experiments zeigt neben der Funktionsweise der beschriebenen



Komponenten auch das genaue Vorgehen beim Experimentieren mit dem Minifallturm auf. Hierbei sind insbesondere die Aufhängung mit dem Elektromagneten, sowie das Auffangen der Fallbox mit dem Spanntuch zu erwähnen. Der Systemcheck soll neben einem ersten Test aller Komponenten auch die Funktion der Mikrogravitationsampel zeigen: Solange die Fallbox an der Aufhängung hängt, zeigt die zweifarbige Leuchtdiode ein grünes Licht an. Sobald der freie Fall beginnt, schaltet sie auf rotes Licht um. Das Ende des freien Falls kann man sehr gut am Wackeln der Kamera und an den entsprechend unscharfen Bildern erkennen.

Abbildung 26: Aufbau: Systemcheck

Mit Hilfe der Mikrogravitationsampel ist es möglich, die Fallzeit der Fallbox zu bestimmen. Hierzu werden die während des freien Falls aufgenommenen Einzelbilder der Minikamera gezählt. Mit der Kenntnis, dass die Kamera, dem Videostandard entsprechend, 25 Bilder pro Sekunde aufnimmt, kann man die Fallzeit recht exakt auf etwa 0,04 Sekunden genau bestimmen und somit die Fallhöhe abschätzen. Bei 16 Einzelbildern, wie man sie im Fall des von mir getesteten Aufbaus erhält, ergibt sich die Fallhöhe aus einer Fallzeit von 0,64 Sekunden, zu 2,009 Metern, was sehr gut mit dem gemessenen Wert von $2,00 \pm 0,01$ Metern übereinstimmt.

5.3.2 Experiment 2: „Briefwaage“

Das zweite Experiment soll bereits auf den Begriff der Gewichtlosigkeit hinführen. Hierzu wird eine, von einem Gegenstand belastete Briefwaage im freien Fall beobachtet. Die Schüler sollen sich klar machen, dass der freie Fall zwar nichts an der Masse eines Gegenstandes, wohl aber an dessen messbarem Gewicht verändert. Die verwendete Briefwaage beruht auf dem Prinzip der Federwaage, da man mit einer solchen gute Ergebnisse erzielt. Zudem ist die Funktionsweise der Federwaage bei Schülern ab der achten Jahrgangsstufe hinlänglich bekannt. Die Schüler können sich also auf die Veränderungen im freien Fall konzentrieren.

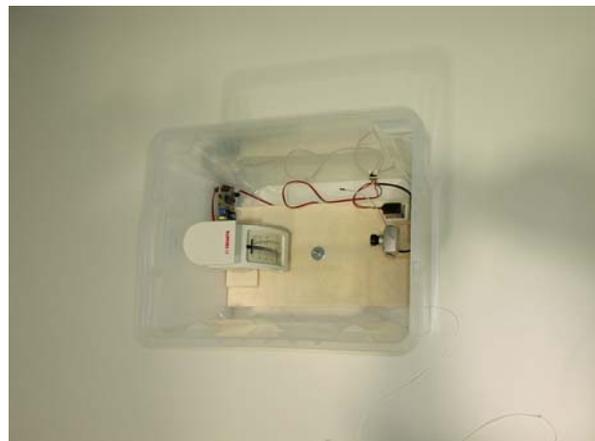


Abbildung 27: Aufbau: Briefwaage

Bei der Durchführung des Experiments erkennt man sehr schön, dass die Federwaage im freien Fall, nach einer kurzen Einschwingphase, nicht mehr das zuvor gemessene Gewicht des Gegenstandes anzeigt, sondern sogar einen negativen Wert. Dieser rührt daher, dass die Feder der Waage auch ohne auf der Waage befindliche Gegenstände durch das Gewicht der Waagschale gespannt ist. Da diese aber im freien Fall ebenfalls gewichtslos ist, kann sich die Feder komplett entspannen und die Waage zeigt ein negatives Gewicht an.

5.3.3 Experiment 3: „Sanduhr“

Ein entscheidender Aspekt der Gewichtlosigkeit ist das Fehlen von Auftriebskräften. Viele der physikalisch- technischen Forschungsinhalte der Mikrogravitationsforschung beruhen auf gerade dieser Tatsache. Das Experiment „Sanduhr“ ist daher eines von drei Experimenten, die auf dem Fehlen der Auftriebskraft basieren.



Abbildung 28: Sanduhr

Die verwendete Sanduhr ist nämlich tatsächlich keine echte Sanduhr, bei der Sand durch eine kleine Öffnung rieselt. In ihr steigen vielmehr kleine Kunststoffkugelchen, die in durchsichtigem Öl schwimmen nach Passieren einer kleinen Öffnung nach oben.

Im freien Fall verschwindet die Auftriebskraft und der Strom der aufsteigenden Kugelchen verlangsamt sich deutlich. Neben dem Fehlen des Auftriebs unter Gewichtlosigkeit kann man mit diesem Experiment die Massenträgheit plausibel machen. Die Kugelchen bleiben beim Auslösen des freien Falls nicht etwa auf der Stelle stehen sondern werden lediglich nicht weiter beschleunigt und daher durch die Reibung im Öl abgebremst.

Der Hauptgrund für die Auswahl dieser „falschen“ Sanduhr war aber ganz einfach deren schönes, buntes Aussehen. Selbstverständlich könnte man den Versuch auch mit einer normalen Sanduhr machen, hätte dann aber andere Aspekte zu betrachten.

Übrigens wird am Ende des Kapitels noch etwas genauer darauf eingegangen, welche weiteren Experimente mit dem Minifallturm ohne großen Aufwand realisierbar sind.

In der Durchführung des Experiments hat sich gezeigt, dass man das Fehlen des Auftriebs und damit die verringerte Strömungsgeschwindigkeit nicht immer auf Anhieb gut erkennen kann.

Abhilfe schafft hier leider nicht die Einzelbildauswertung, da es hierbei schwierig ist, die Strömungsgeschwindigkeit ohne Rechnung darzustellen. Ein probates Mittel, um die verringerte Strömungsgeschwindigkeit in der kurzen Beobachtungszeit von nur etwa 0,6 Sekunden zu visualisieren, ist eine Zeitlupenansicht des Videos, wie sie bei vielen

Videoabspielprogrammen möglich ist. Wegen der einfachen Bedienbarkeit habe ich hierfür das Programm „VLC-Player“, das es als Freeware zum Download³⁴ gibt, verwendet.

³⁴ <http://www.videolan.org/vlc/> (23.05.2006)

5.3.4 Experiment 4: „Auftrieb“

Nachdem das Fehlen von Auftrieb eine so wichtige Rolle in der Mikrogravitationsforschung spielt, sollte sich ein Experiment ausschließlich dieser Thematik widmen. Hierzu befindet sich eine Styroporkugel, die mit einem Holzstab verbunden ist, in einem vollständig mit Wasser gefüllten Behälter. Dieses hat an seinem Deckel ein Loch, durch den der Holzstab frei beweglich herausragt. Unter normalen Schwerebedingungen wird somit die Styroporkugel nach oben gedrückt. Der Holzstab wird durch ein Loch im Deckel der Fallbox geführt, und stößt, wenn die Fallbox an der Halterung hängt, gegen diese (vgl. nebenstehende Skizze). Die Länge des Holzstabes ist genau so lang, dass die Styroporkugel unter Wasser auf den Boden des Gefäßes gedrückt wird. Man kann sich vor der Durchführung des Versuches davon überzeugen, dass die, auf die Styroporkugel und den Holzstab wirkende Auftriebskraft beide innerhalb kürzester Zeit nach oben drückt.



Abbildung 29: Auftrieb

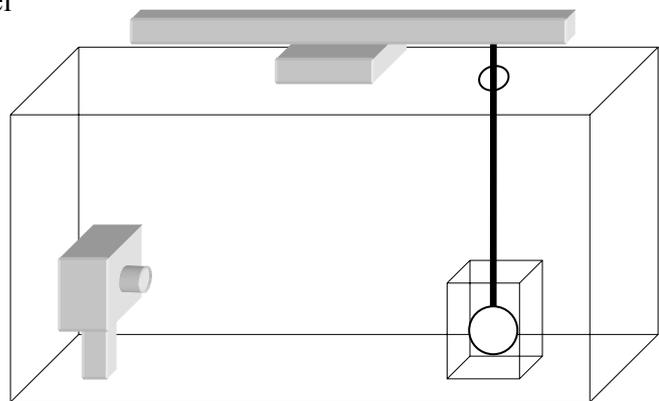
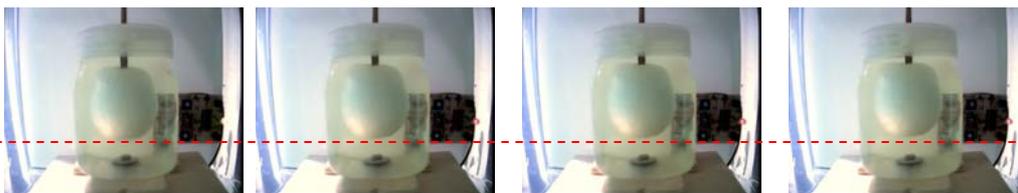


Abbildung 30: Schematischer Aufbau des Experiments: "Auftrieb"

Die Länge des Holzstabes ist genau so lang, dass die Styroporkugel unter Wasser auf den Boden des Gefäßes gedrückt wird. Man kann sich vor der Durchführung des Versuches davon überzeugen, dass die, auf die Styroporkugel und den Holzstab wirkende Auftriebskraft beide innerhalb kürzester Zeit nach oben drückt.

Lässt man hingegen die Box mit darin befindlicher Styroporkugel fallen, stellt man deutlich sichtbar fest, dass sich die Kugel erst ein kleines Stück nach oben (Bilder 1 bis 4) bewegt und dann stehen bleibt, ohne weiter aufzusteigen (Bilder 5 bis 8). Erst wenn der Luftwiderstand nach etwa 0,3 Sekunden, also ungefähr acht Einzelbildern, beginnt die Fallbox merklich zu bremsen, steigt die Styroporkugel wieder auf (Bilder 9 bis 16).



1

2

3

4

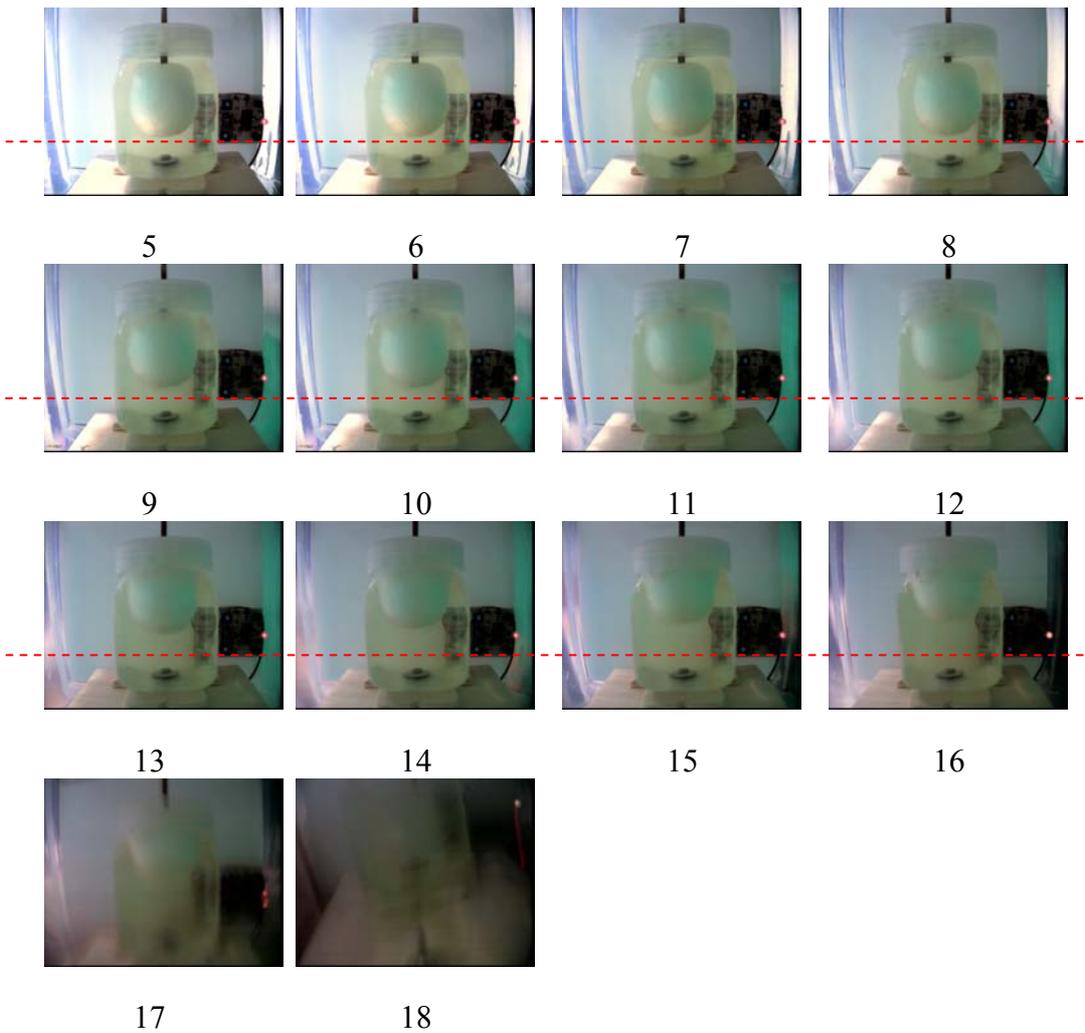


Abbildung 31: Bilderfolge: Auftrieb

Anfangs hatte ich angenommen, dass die Styroporkugel aus Symmetriegründen eventuell in der Mitte des Gefäßes die energetisch günstigste Position hat und daher bis dorthin aufsteigt. Dann sollte sie aber, wenn sie sich zu Beginn des freien Falls in der Mitte befindet, auch dort bleiben. Wie die Bilderfolge zeigt, ist das nicht ganz der Fall, sondern sie steigt auch ein kleines Stück auf, wenn sie sich zu Beginn in der Mitte des Gefäßes befindet.

Der Grund für dieses Verhalten scheinen Reibungseffekte, sowie Restmagnetismus im Elektromagneten zu sein, welche dazu führen, dass der Fall der Fallbox bereits am Anfang nicht völlig *frei* ist. Der Dichteunterschied der Styroporkugel und des Wassers ist so groß, dass bereits kleine Beschleunigungswerte in einer relativ großen Auftriebskraft resultieren. Allerdings lässt sich auf diese Weise nicht belegen, dass die anfängliche Annahme, in der Mitte des Gefäßes sei ein energetisch optimaler Zustand, falsch ist. Man sieht lediglich, dass sie nicht der einzige Grund für das Aufsteigen am Beginn des freien Falls sein kann.

Zu Beginn dieser Experimentierphase traten übrigens unvorhergesehene Probleme auf. Zwar blieb die Styroporkugel nach kurzem Aufsteigen ungefähr auf der Hälfte der Füllhöhe des

Gefäßes stehen, aber das im Behältnis befindliche Wasser verhielt sich unerwartet. Zu diesem Zeitpunkt war der Wasserbehälter *nicht* vollständig mit Wasser gefüllt und man konnte deutliche erkennen, dass das Wasser an den Seiten des Gefäßes nach oben stieg.

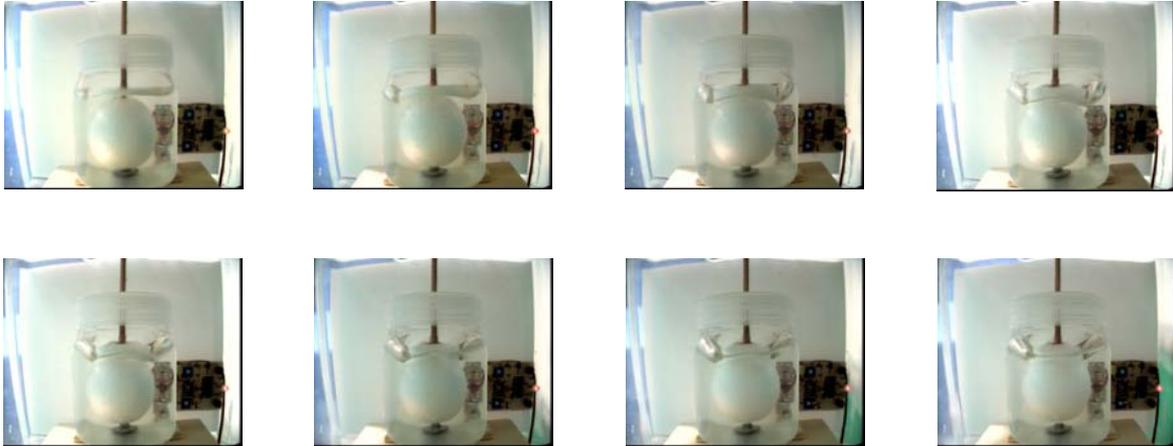


Abbildung 32: Bilderfolge: Auftrieb alt

Der Grund hierfür ist die Adhäsion der Wassermoleküle untereinander und mit den Kunststoffwänden des Gefäßes. Aufgrund des starken Dipolcharakters von Wasser, haften die Moleküle aneinander und eben auch an den Wänden des Gefäßes. Zur Veranschaulichung dieser Adhäsionskraft stelle man sich einen Wassertropfen vor, der zum Beispiel nach dem Händewaschen, an einem Finger hängt und der Schwerkraft trotzt.

Ebenso verhalten sich auch die Wassermoleküle im genannten Gefäß – sie benetzen die Seitenwände. Fällt nun im freien Fall die Gewichtskraft als statische Kraft weg und dient nur noch der Beschleunigung der Fallbox samt Inhalt, so kann das Wasser an den Gefäßwänden aufsteigen und so das Versuchsergebnis „verfälschen“.

Übrigens war ich der Ansicht, dass die „verfälschten“ Versuchsergebnisse so viel an interessanter Physik beinhalten, dass ich bei allen untersuchten Schüler- und Lehrergruppen ein nicht vollständig gefülltes Behältnis verwendet habe. Unter Umständen wäre es jedoch besser, die beiden Phänomene entkoppelt zu betrachten, also zum einen das Experiment „Auftrieb“ mit vollständig mit Wasser gefülltem Gefäß und anschließend ein eigenes Experiment, das sich mit dem Problem der Adhäsion beschäftigt. Ein solches wurde zwar inzwischen fertig gestellt und wird am Ende dieses Kapitels beschrieben, es wurde jedoch noch nicht an Schülergruppen getestet.

5.3.5 Experiment 5: „Verbrennung“

Thematisch ähnlich wie die beiden vorhergehenden Experimente ist das Experiment „Verbrennung“, das letzten Endes auch auf Auftriebseffekten beruht. Bei Verbrennungsvorgängen, also der Oxidation chemischer Stoffe, spielen diese eine herausragende Rolle. Da heiße Gase im Allgemeinen eine geringere Dichte haben als kalte, ist eine Kerzenflamme unter



Abbildung 33: Verbrennung

Schwerkrafteinfluss prinzipiell nach oben gerichtet und hat die wohlbekannt Form, wie auf dem Bild zu sehen. Wie aber verhält sich eine Flamme, wenn keine Auftriebskräfte wirken? Im Experiment kann man sehr deutlich erkennen, dass die zuvor längliche Flamme der Kerze innerhalb kürzester Zeit stark schrumpft und kugelförmig wird. Zudem verliert sie deutlich an Leuchtkraft, was sich erfreulicherweise auch in einer besseren Sichtbarkeit der Flamme zeigt, da die Kamera bei normal leuchtender Kerze etwas überbelichtet ist.

Die Bilderfolge zeigt beispielhaft einen Durchlauf des Experimentes. Man kann deutlich erkennen, wie die Kerzenflamme von Bild 1 – hier hängt die Fallbox noch an der Befestigung, wie man an der grün leuchtenden Leuchtdiode erkennt – bis zum Bild 9 kleiner wird und eine runde Form annimmt. Ab etwa Bild 10 wächst die Flamme wieder und wird auch wieder nach oben hin spitzer. Dies liegt daran, dass, wie bereits zuvor erwähnt, der Luftwiderstand die Fallbox merklich zu bremsen beginnt. Daher ist der Fall der Box nicht mehr als frei zu bezeichnen und es werden wieder Auftriebseffekte sichtbar. Ganz offensichtlich scheint die Kerzenflamme Auftriebserscheinungen etwas sensibler anzuzeigen als die Styroporkugel im vorangegangenen Versuch. Während man bei dieser erst nach etwa zehn Einzelbildern ein deutliches Aufsteigen der Kugel wahrnehmen kann, sieht man die Veränderung der Kerzenflamme bereits nach acht Einzelbildern im freien Fall, also den Bildern 2 bis einschließlich 9.



1



2



3



4

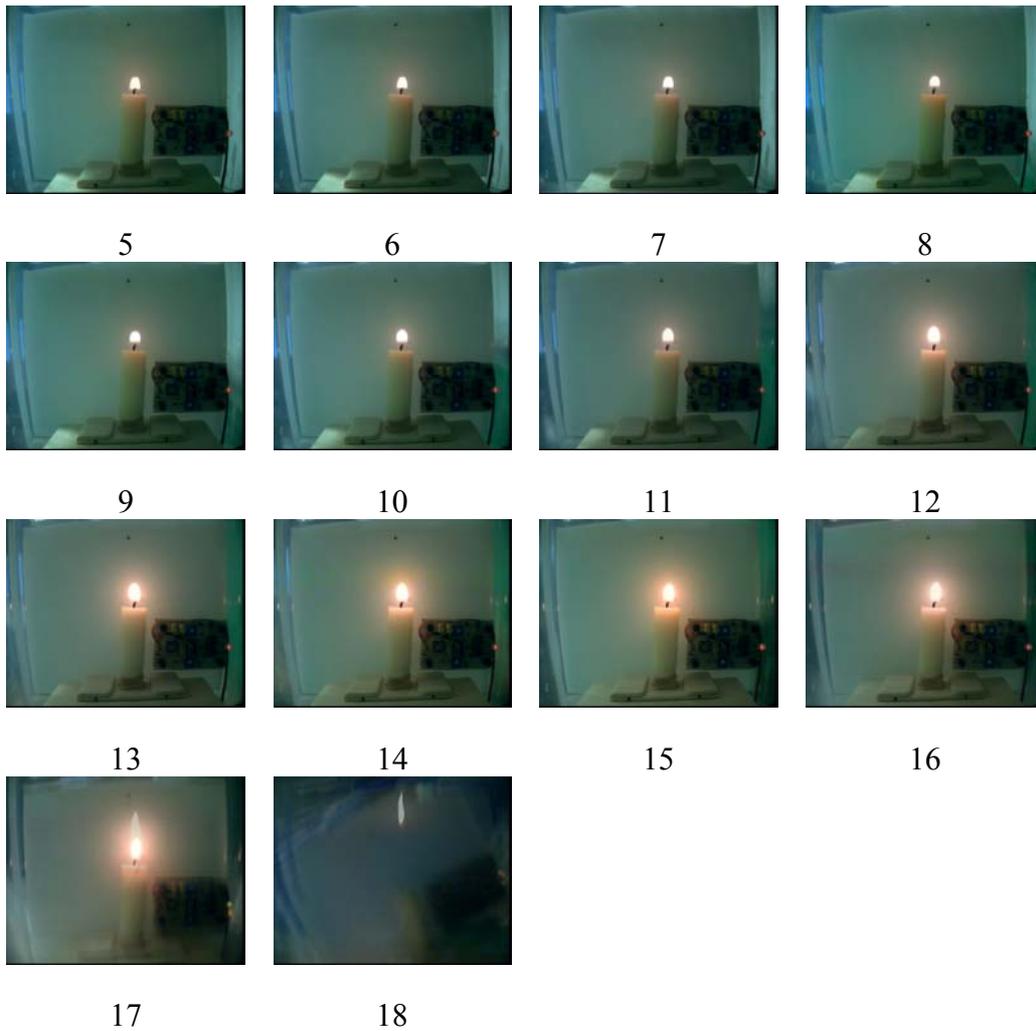


Abbildung 34: Bilderfolge: Verbrennung

Interessant ist auch das Verhalten der Flamme beim Aufprall der Fallbox (Bilder 17 und 18). Man erkennt wie auf Bild 17 die Flamme spontan in die Länge gezogen wird und sich auf Bild 18 nach oben von der Kerze entfernt. Dies liegt daran, dass beim Aufprall der Fallbox in der Auffangbox eine große Bremsbeschleunigung auf die Fallbox und die in ihr befindlichen Komponenten nebst enthaltener Luftmasse wirkt. Diese liegt nach Schätzungen größenordnungsmäßig um ein Dreifaches der Erdbeschleunigung. Das bedeutet aber, dass auch die auf die Flamme wirkende Auftriebskraft dreimal so groß ist, was ausreicht, um die Flamme, das heißt die heißen, brennenden Wachsgase, komplett vom Docht zu reißen. Übrigens ist laut Herrn Dr. Bräucker vom DLR in Köln eine unter Gewichtlosigkeit brennende Kerze nicht heiß genug, um über längere Zeit genügend Wachs zum Weiterbrennen zu verdampfen. Sie geht bereits nach kurzer Zeit aus, wie es auch entsprechende Experimente bei Parabelflügen gezeigt haben. Ein Candlelight Dinner wird es daher auf der internationalen Raumstation wohl niemals geben.

5.3.6 Experiment 6: „Pendel“

Das sechste und letzte bereits mit Schülern getestete Experiment beschäftigt sich mit der Pendelschwingung. Das hierzu verwendete einfach aus Holz aufgebaute physikalische Pendel wird im freien Fall untersucht.



Abbildung 35: Pendel

Um das Pendel vor Beginn des freien Falls in Schwingung zu versetzen, wird durch die Rückwand der Fallbox, in eine Bohrung im Pendel, ein Kupferstab geschoben. Das Loch in der Rückwand der Fallbox ist so positioniert, dass das Pendel nun möglichst weit, also senkrecht nach oben ausgerichtet ist.

Zieht man den Kupferstab heraus, kann das Pendel frei schwingen. Man muss sich nun etwas beeilen, den freien Fall auszulösen, damit das Pendel nicht auf Grund von Reibungsverlusten zum Stehen kommt. Hier wäre es sicherlich sinnvoll, die Lagerung der Rotationsachse des Pendels besser zu gestalten, um die Reibung zu vermindern. Da der Versuch aber im Einsatz mit Schülern auch so sehr gute Ergebnisse lieferte, habe ich von einer aufwändigeren Lagerung abgesehen.

Besonders interessant ist es, den freien Fall genau dann auszulösen, wenn sich das Pendel entweder in einem der beiden oberen Totpunkte, oder aber im untersten Punkt seiner Bahn befindet. Leider ist eine solch exakte Auslösung des freien Falls nicht ohne weiteres möglich. Man kann aber durch entsprechend häufige Durchführung des Experiments sehr nah an diese interessanten Punkte herankommen und somit das Verhalten des Pendels gut erkennen.

Insgesamt gesehen ist der Versuch „Pendel“ der in der Durchführung schwierigste, da man sich in der Gruppe gut absprechen muss, wer wann welche Tätigkeit durchführt. Daher ist dieser Versuch der Letzte der insgesamt sechs Versuche. Es zeigte sich aber bei der Durchführung, dass die experimentierenden Schüler in den vorangehenden Experimenten genug Erfahrung sammeln, um den Pendelversuch zu meistern.

Die Bilderfolge zeigt, wie sich das Pendel verhält, wenn der freie Fall ausgelöst wird, wenn sich das Pendel nahe einem oberen Totpunkt befindet (Bild7, siehe Mikrogravitationsampel). Anscheinend war beim Auslösen die Aufwärtsbewegung des Pendels noch nicht völlig beendet, weshalb es in den folgenden Bildern noch etwas aufsteigt. Nach 12 Bildern (Bild18) des freien Falls, also nach etwa 0,48 Sekunden merkt man auch hier, wie der Luftwiderstand

die Fallbox abbremst. Bei genauem Hinsehen kann man erkennen, dass das Pendel nach Bild19 wieder abzusinken beginnt, also spätestens hier, auch im Bezugssystem der Fallbox, wieder eine Gewichtskraft wirkt. Tatsächlich merkt man die nicht perfekte Mikrogravitation bereits daran, dass sich das Pendel auf den Bildern 7 bis 12 verlangsamt und nicht mit gleich bleibender Geschwindigkeit weiterbewegt.

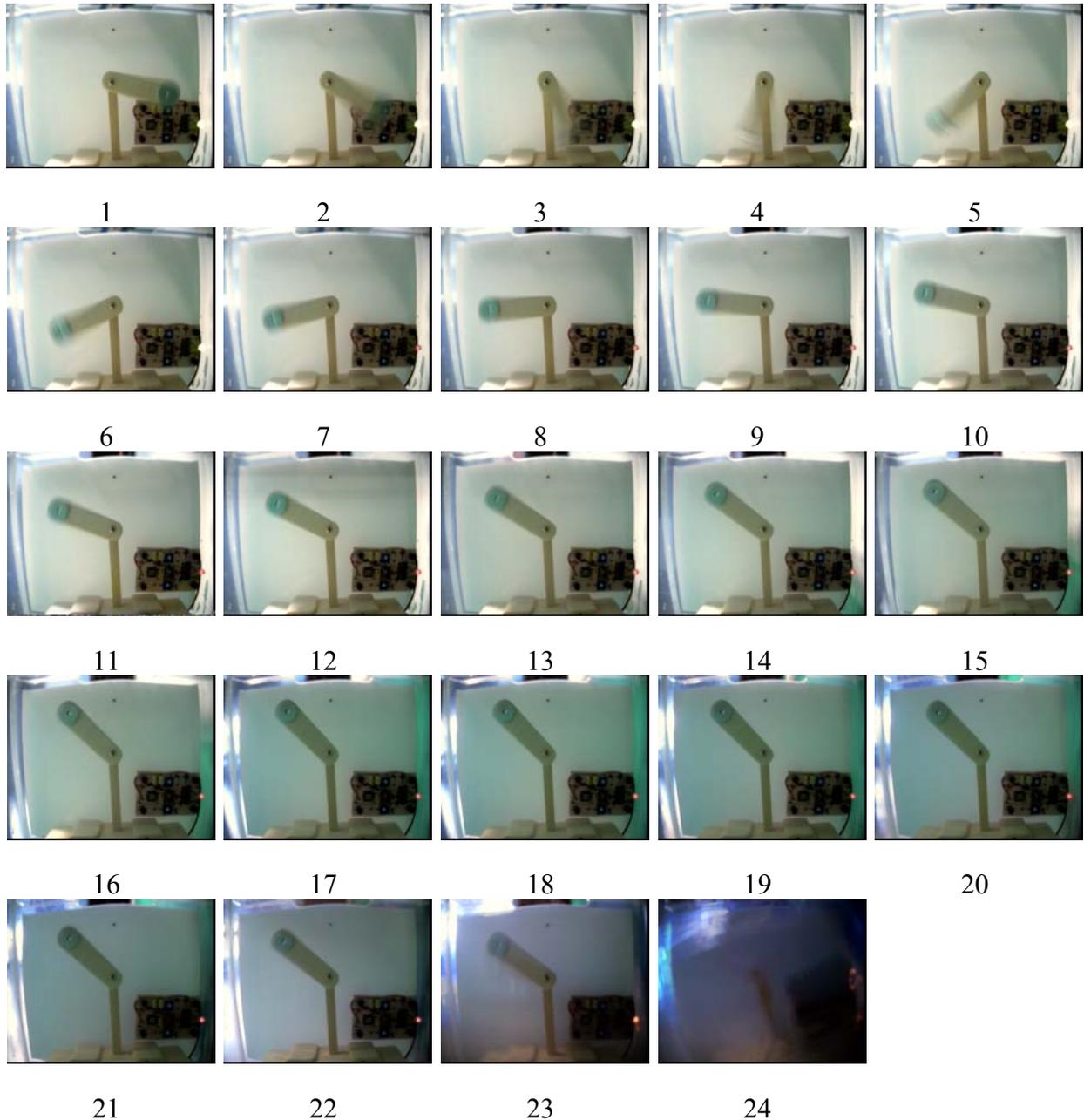


Abbildung 36: Bilderfolge: Pendel am oberen Totpunkt

Befindet sich das Pendel beim Auslösen des freien Falls nahe dem unteren Durchgang und hat dadurch auch eine große Geschwindigkeit, so kann man deutlich erkennen, dass im freien Fall dessen Bewegung wenig gebremst wird. Zwar zeigt die obige Bildfolge, dass wegen des Luftwiderstandes bereits sehr schnell wieder eine Gewichtskraft auf das Pendel im

beschleunigten Bezugssystem der Fallbox wirkt, diese ist jedoch relativ gering. Somit ist es möglich, dass das Pendel nicht am oberen Totpunkt zurückschwingt, sondern über diesen hinaus geht und mehr als eine volle Umdrehung durchläuft. Die bremsende Kraft wird hierbei auf Grund der relativ hohen Anfangsgeschwindigkeit nicht sichtbar.



Abbildung 37: Bilderfolge: Pendel im unteren Durchgang

5.3.7 Weitere Experimente

Bereits zu Beginn meiner Überlegungen über den Minifallturm wurde mir klar, dass die Möglichkeiten mit dem Minifallturm zu experimentieren sehr vielfältig sind. Und so sind die in den vorangehenden Punkten vorgestellten mit Schülern getesteten Experimente auch nur eine Auswahl dessen, was mir im Laufe der Zeit an Experimentideen einfiel.

Interessant und relativ einfach zu verwirklichen wären noch weitere Experimente zum Thema Adhäsion und Oberflächenspannung. Bereits von mir getestet wurde, wie im Punkt 4.1.3.4. erwähnt, der folgende Aufbau:

Ein rundes, verschließbares Glasgefäß wird so mit Wasser gefüllt, dass noch ein kleines Luftvolumen im Gefäß bleibt. Lässt man nun das Gefäß in der Fallbox fallen, so kann man sehen, wie das Wasser an den Rändern aufsteigt und die Luft verdrängt. Die Luft muss nach unten hin ausweichen und bildet eine Kugel.

Die Wichtigste Voraussetzung für ein Gelingen dieses Experimentes ist, dass das Gefäß sehr sauber ist. Andernfalls ist das Ergebnis nicht so schön, und man sieht lediglich ein leichtes Aufsteigen des Wassers.

Ein weiteres Experiment zur Adhäsion könnte folgendermaßen aussehen:

In einem Behälter befindet sich Wasser, in das ein Röhrchen als Kapillare ragt. Man sieht, dass das Wasser bereits unter normalen Schwerebedingungen ein wenig in der Kapillare aufsteigt. Im freien Fall wird das Wasser noch höher steigen.

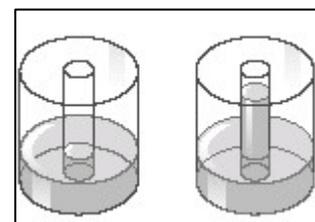


Abbildung 38:
Kapillarwirkung

Man könnte auch eine ganz normale Sanduhr im freien Fall beobachten.

Gute Ideen findet man übrigens auch in der Spielwarenabteilung: Vom Kreisel über Wasserspielzeug bis hin zu unterschiedlichstem Magnetspielzeug – alles, was in die Fallbox passt, ungefährlich ist und für mindestens 15 Sekunden völlig selbstständig funktioniert, kann man prinzipiell in der Fallbox untersuchen.

Getestet wurden allerdings nur die sechs in den vorangehenden Punkten genannten Experimente, die bereits einen interessanten Einblick in Mikogravitationsphänomene ermöglichen und zudem innerhalb von zwei Stunden mit Schülern durchführbar sind.

5.4 Der Minifallturm im Einsatz

Der Minifallturm ist so konzipiert, dass ein Experimentieren daran auch ohne Betreuung durch einen Lehrer möglich sein sollte. Hierzu wurde in mehreren Testläufen mit Schülergruppen von vier bis sieben Schülern der Jahrgangsstufen zehn, elf, zwölf und dreizehn eine Experimentieranleitung entwickelt und sukzessive verbessert. Zusätzliche Verbesserungsanregungen brachte der Einsatz des Minifallturms bei drei Lehrerfortbildungen für Physiklehrer. Sowohl die Schüler, als auch die Lehrer wurden im Rahmen eines Besuchs des DLR Schol_Lab in Oberpfaffenhofen akquiriert. Die Experimentierzeit war bei den Schülern auf 120 Minuten, bei den Lehrergruppen auf eine Stunde beschränkt, da alle Experimente im DLR Schol_Lab Oberpfaffenhofen für diese Zeiten ausgelegt sind. Im Folgenden sollen einige der Erfahrungen mit den Schülergruppen und die daraufhin vorgenommenen Veränderungen an der Experimentieranleitung und am Minifallturm, beziehungsweise der Fallbox, beschrieben werden.

5.4.1 Die ersten beiden Schülergruppen

Bei der ersten Schülergruppe am 25. Januar 2006 stand die Frage der prinzipiellen Durchführbarkeit der Experimente im Vordergrund. Zudem war es noch etwas fraglich, ob die Fallbox den Belastungen im realen Schülereinsatz gewachsen sein würde.

Als Versuchsgruppe dienten vier männliche Schüler der zehnten Klasse des Gymnasiums Sonthofen. Bei den durchgeführten Experimenten fehlte noch das Experiment „Briefwaage“, welches erst bei der dritten Schülergruppe eingesetzt wurde.

Im Großen und Ganzen stellte sich der Minifallturm als bereits recht gut durchdacht heraus. Es gab zu keinem Zeitpunkt Probleme mit der Stabilität der einzelnen Komponenten und alle fünf durchgeführten Experimente waren erfolgreich. Obwohl den Schülern im Vorfeld der Begriff „Schwerelosigkeit“ oder „Mikrogravitation“ nicht genannt worden war, wurde ihnen



Abbildung 39: Die erste Schülergruppe

bereits beim zweiten Versuch, der zu dieser Zeit der Versuch „Sanduhr“ war, klar, dass frei fallende Körper gewichtslos sind.

Als verbesserungswürdig wurden allerdings Teile der Anleitung identifiziert, die an manchen Stellen noch zu ungenau formuliert war. Insbesondere die Videoauswertung stellte sich als etwas schwierig heraus und musste während des Versuchs erklärt werden. Auch die Fragen zur Versuchsauswertung waren zum Teil noch nicht optimal gestellt und teilweise zu schwer. Der erfreulicherweise einzige Teil, der an der Fallbox selbst Probleme bereitete, war die Aufhängung, die noch keine zwingende Eindeutigkeit besaß. Schlimmsten Falls hätte die Fallbox nicht exakt in die Auffangkiste fallen können.

Eine zweite Schwachstelle an der Fallbox wurde von der zweiten Schülergruppe am selben Tag identifiziert. Diese kam von derselben Schule und bestand aus drei Jungen und drei Mädchen der zehnten Klasse. Das Problem bestand darin, den Deckel der Fallbox zu öffnen, da sich an diesem kein Griff befand. Weitere Probleme mit dem Minifallturm waren nicht festzustellen.

Allerdings hatten die Schüler der zweiten Testgruppe ähnliche Verständnisprobleme wie ihre Vorgänger bezüglich der Experimentieranleitung und der Versuchsauswertung, insbesondere beim Versuch „Auftrieb“.



Abbildung 40: Die zweite Schülergruppe

5.4.2 Veränderungen nach den ersten Probedurchgängen

Die Experimentieranleitung wurde entsprechend den gemachten Erfahrungen einer kompletten Überarbeitung unterzogen. Diese waren im Wesentlichen:

- Weglassen des Wortes „Schwerelosigkeit“ beziehungsweise „Gewichtslosigkeit“ in der Anleitung
- Verbesserte Beschreibung der Videoaufzeichnung, sowie deren Auswertung am Anfang der Anleitung
- Genauere Erklärung des Scharfstellens von Receiver und Kamera
- Erklärungen zum Auswerten der Videos und der Einzelbilderanzeige
- Straffziehen des Fangtuchs zu Beginn der Experimente

- Bessere Anleitung des Experiments „Pendel“ mit Countdown zum Starten
- Veränderte Auswertung des Experiments „Sanduhr“
- Reihenfolge der Experimente verändert („Auftrieb“ jetzt nach „Sanduhr“, statt am Ende)
- Andere Auswertung für „Auftrieb“
- Warnhinweise beim Experiment „Verbrennung“
- Anleitung und Auswertung des Experiments „Pendel“ verändert
- Dokumentstruktur verändert: Auswertung ganz am Ende

5.4.3 Die erste Lehrergruppe

Bereits am 26. Januar 2006 hatte ich die Möglichkeit, den Minifallturm mit einer Gruppe bestehend aus drei Physikreferendaren zu testen. Bis dahin hatte ich noch keine Veränderungen am Aufbau der Fallbox, insbesondere der Aufhängung, gegenüber dem Vortag vorgenommen. Die Anleitung hatte ich aber bereits in den oben genannten Punkten verändert und konnte so überprüfen ob sich deren Verständlichkeit verbessert hatte.

Die Referendare erhielten ebenso wie die Schüler zuvor lediglich die Experimentieranleitung sowie ein paar einführende Worte und wurden dann dem selbständigen Experimentieren überlassen. Im Anschluss an die Experimente erhielten die Referendare die Möglichkeit mittels eines Fragebogens Verbesserungsvorschläge zu machen.

Im Wesentlichen hatten die Referendare keine Probleme beim Umgang mit dem Fallturm und seinen Komponenten. Lediglich die Videoanalyse der einzelnen Experimente, sowie das korrekte Aufhängen der Fallbox mussten noch während des Experimentierens von mir angeleitet werden. Zusätzlich zu diesen Punkten erhielt ich noch einige zusätzliche Verbesserungsvorschläge, die sich in den folgenden Veränderungen widerspiegeln.

5.4.4 Veränderungen nach der ersten Lehrergruppe

- Aufhängung verbessert
- Hintergrund im Blickfeld der Kamera zur besseren Sichtbarkeit mit weißer Folie abgeklebt
- Neues Experiment „Briefwaage“ fertig gestellt
- Auswertung der Videos auch mit dem Programm „VLC-Player“, um Zeitlupenfilme zu ermöglichen

- Erweiterung der Bedienungsanleitung zum Experiment „Briefwaage“ als zweites Experiment
- Bessere Erklärung zum Thema: Video Abspielen
- Änderung der Auswertung zum Experiment „Auftrieb“
- Änderung aller Auswertungen: Aufteilung in „Allgemeines“ und „Freier Fall“

5.4.5 Die zweite Lehrergruppe

Die nächste Testgruppe war am 31. Januar 2006 eine Gruppe aus drei Fachbetreuern der Physik. Die an der Anleitung und der Fallbox gemachten Veränderungen stellten sich als gelungen heraus. Leider hatte die Gruppe mit nur einer Stunde zu wenig Zeit, um alle Experimente völlig selbständig durchzuführen und musste daher in den einzelnen Experimenten von mir angeleitet werden.

Die zuvor als kritisch identifizierten Phasen der Videoauswertung und das Aufhängen der Fallbox geschahen hingegen von mir weitestgehend unangeleitet und verliefen erfolgreich. Als Verbesserungsvorschläge wurde neben einer für den Schulalltag besser geeigneten Fallturmkonstruktion die automatische Auslösung der Videoaufzeichnung beziehungsweise des freien Falls genannt.

Während eine andere, schultauglichere Fallturmkonstruktion von mir bereits geplant war, entschied ich mich, das Auslösen des freien Falls nicht zu automatisieren, da ich der Meinung bin, dass der dafür notwendige Aufwand in keinem Verhältnis zum entstehenden Nutzen steht. Außerdem kann man meines Erachtens an einem nicht vollautomatischen Experiment mehr lernen, als an einem, bei dem alle Probleme und mögliche Fehlerquellen bereits von vornherein ausgeschlossen sind.

Zudem ist, wenn man den Versuchsaufbau und den Ablauf der Experimente noch nicht kennt, bei der jetzigen Durchführungsart die Arbeit im Team fast zwingend notwendig. Wäre das gesamte Experiment vollkommen automatisiert, könnte es gerade diesen Gruppenaspekt verlieren, den ich für überaus wichtig halte³⁵.

³⁵ Vgl.: Mietzel Gerd, 2003: Pädagogische Psychologie des Lernens und Lehrens. 3. Auflage

5.4.6 Die dritte Schülergruppe

Am 6. Februar 2006 konnten alle oben genannten Veränderungen an einer Gruppe bestehend aus 4 männlichen und zwei weiblichen Schülern der Jahrgangsstufe dreizehn mit Leistungskurs Physik getestet werden. Zusätzlich zu den oben genannten hatte ich nach einem Gespräch mit Herrn Hopf noch einige Veränderungen am Text der Anleitung vorgenommen, um diese verständlicher zu gestalten.

Die Experimente verliefen zur vollsten Zufriedenheit sowohl meinerseits als auch auf Seiten der Schüler, die den Experimenten in entsprechenden Fragebögen ein durchweg positives Feedback gaben. Der einzige genannte Kritikpunkt dieser Gruppe war die Stabilität des verwendeten Fallturms, dem zuvor erwähnten Werbeaufsteller. Allerdings gestanden die Schüler ein, dass es prinzipiell nicht nötig sei, den Fallturm so stabil zu bauen, dass man sich daran anlehnen könnte.

Da der Durchgang mit dieser Gruppe in der Durchführung der Experimente keine Probleme zeigte, wurden seitdem weder an der Anleitung noch am Aufbau des Minifallturms weitere Veränderungen vorgenommen. Die weiteren Versuchsgruppen sollten zeigen, ob es sich bei der eben beschriebenen Gruppe um einen glücklichen Einzelfall handelte, oder ob Fallturm und Anleitung im Wesentlichen ein Niveau erreicht hatten, das einen prinzipiellen Einsatz im Physikunterricht erlaubt.

5.4.7 Erfahrungen mit weiteren Schüler- und Lehrergruppen

Die Erprobung des Minifallturms mit weiteren Schüler- und Lehrergruppen zeigte, dass die Durchführung der verschiedenen Experimente, sowie die Bedienung des PC von Schülern ab der elften Klasse ohne weitere Anleitung möglich sind. Auch Lehrer haben mit den Versuchen keine Schwierigkeiten.

Die Einzige noch gebliebene Problemstelle bei der Versuchsdurchführung ist das Scharfstellen des Videoempfängers. Hierfür wird etwas Fingerspitzengefühl benötigt. Allerdings gelang es nach



Abbildung 41: Auswertung der Experimente am PC

einigen Versuchen allen Schülern und Lehrern, die den Minifallturm bedient haben, dieses Problem zu lösen.

Etwas anders verhält es sich in Bezug auf die Auswertung der einzelnen Experimente. Bereits die ersten Versuchsgruppen hatten das Bedürfnis, für die von ihnen gefundenen Auswertungsergebnisse eine Art Musterlösung zu erhalten. Oft musste den Schülern bei der Auswertung der Experimente geholfen werden, was wohl auch an der Kürze der Zeit lag, die für die Experimente vorhanden war.

Es zeichnete sich in den Experimenten aller Gruppen ab, dass es für die meisten Schüler sehr schwierig ist, sich innerhalb von nur zwei Stunden die Fähigkeit zur Bedienung des Minifallturms sowie die aus den Experimenten resultierende Physik anzueignen beziehungsweise klar zu machen. Etwas leichter schien die Versuchsauswertung Schülern zu fallen, die bereits wussten, dass im freien Fall Gewichtslosigkeit herrscht.

Insgesamt denke ich daher, dass es sinnvoll ist, die Versuchsergebnisse mit den Schülern zu besprechen und ihnen, wenn nötig, bei der Auswertung ein wenig auf die Sprünge zu helfen, um möglichen Frustrationen vorzubeugen.

Da das Thema Gewichtslosigkeit, wie entsprechende Fragebögen zeigten, auch für viele Lehrer sehr theoretisch ist, und daher eben auch für sie manche Versuchsergebnisse überraschend sein könnten, ist den Fragen in der Versuchsauswertung im Anhang auch eine Lösung beigefügt, die über die jeweils zugrunde liegenden Sachverhalte informieren und die, hinter den Ergebnissen stehende Physik erklären soll.



Abbildung 42: Kurz vor dem Auslösen des freien Falls

5.4.8 Zusammenfassung der Ergebnisse der verschiedenen Gruppen

Insgesamt wurde der Minifallturm in sechs Schülergruppen der Jahrgangsstufe zehn bis dreizehn und an drei Lehrergruppen getestet. Die Tabelle zeigt die Aufteilung der Versuchspersonen.

Schüler				
Gruppe	Klasse	Weiblich	Männlich	Gesamt
1	10	/	4	4
2	10	3	3	6
3	13	2	4	6
4	12	2	2	4
5	11	4	1	5
6	12	/	7	7
				32

Lehrer				
Gruppe	Bemerkung	Weiblich	Männlich	Gesamt
1	Referendare	1	2	3
2	/	/	3	3
3	/	1	4	5
				11

Neben der Beobachtung der Versuchspersonen sollten Fragebögen helfen, die Meinung der Schüler und Lehrer über den Minifallturm zu erfahren. Aus der Beobachtung der Versuchsgruppen konnte wie oben beschrieben abgeleitet werden, dass der Minifallturm in seiner derzeitigen Form auf jeden Fall für einen Einsatz im Physikunterricht geeignet ist. Alle Experimente laufen zufrieden stellend und die Ergebnisse sind aussagekräftig genug, um die zugrunde liegende Physik zu erklären. Eingangs erwähnte Bedenken bezüglich der Stabilität des Versuchsaufbaus konnten nicht bestätigt werden, da zu keiner Zeit eines der einzelnen Bauteile Schaden genommen hat.

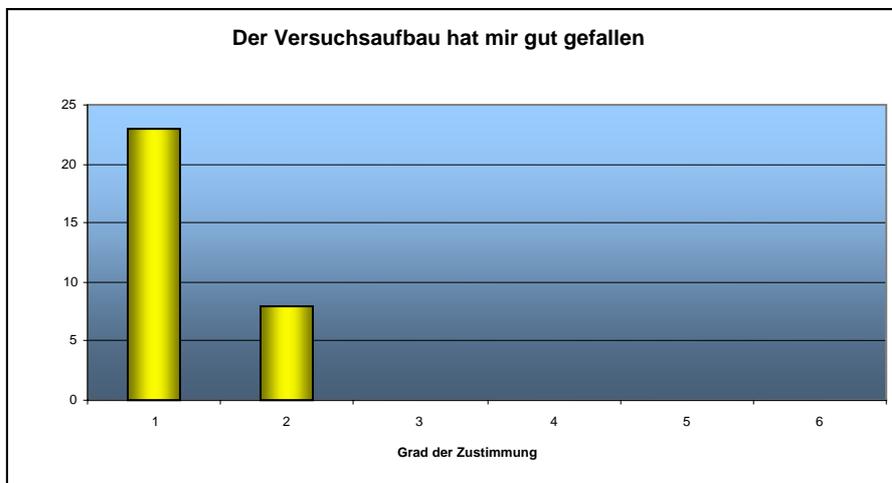
Die Frage, ob der Minifallturm den an ihn gestellten Anforderungen bezüglich Stabilität und Durchführbarkeit der Experimente gerecht würde, reicht allerdings als Rechtfertigung dafür, ein solches Gerät für den Physikunterricht zu bauen noch nicht aus. Entscheidend ist nämlich

auch, wie gut der Minifallturm und das Konzept, Gewichtlosigkeit im Schulunterricht durchzunehmen, bei Schülern und Lehrern ankommt. Die Diagramme zeigen, wie die Testpersonen auf Fragen zum Minifallturm geantwortet haben. Die Bewertung erfolgte anhand der Skala:

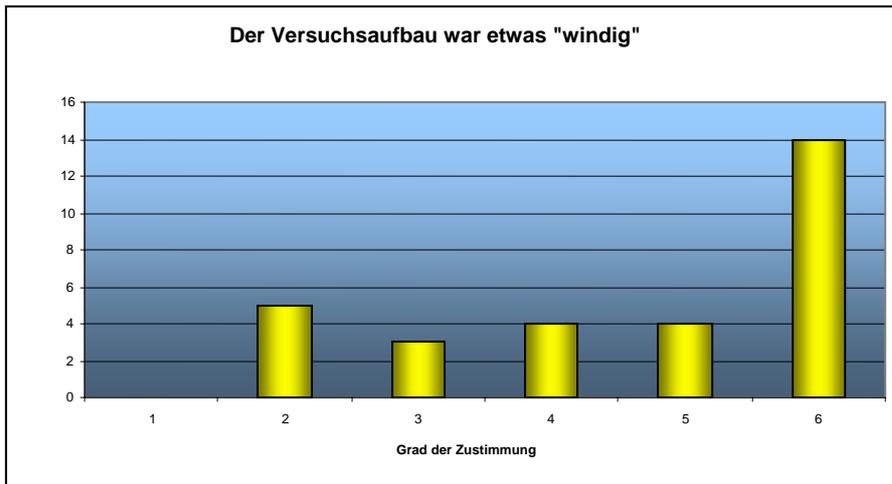
Stimme voll und ganz zu	Stimme eher zu	Stimme ein wenig zu	Stimme kaum zu	Stimme eher nicht zu	Stimme gar nicht zu
1	2	3	4	5	6

5.4.8.1 Ergebnisse der Schülerbefragung

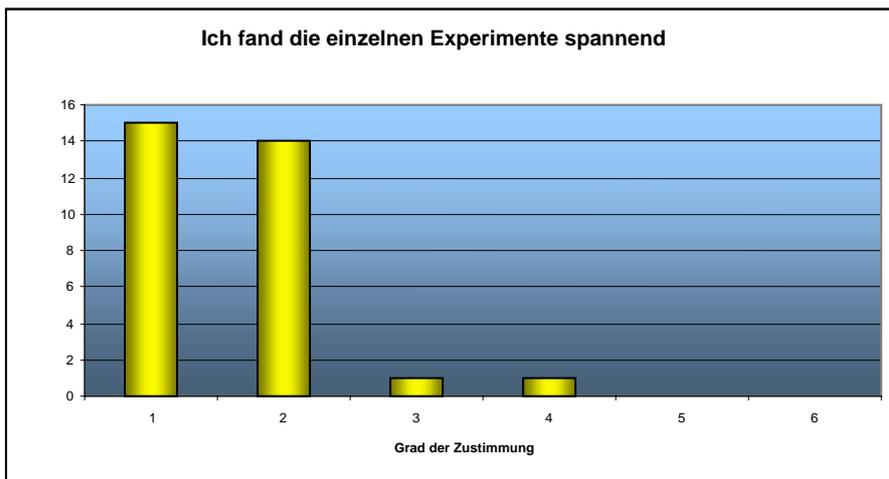
Die Schüler wurden gebeten, den Versuchsaufbau insgesamt zu bewerten. Hierzu dienten die Behauptungen „Der Versuchsaufbau hat mir gut gefallen“ und zur Kontrolle „Der Versuchsaufbau war etwas „windig““. Während erstgenannte Behauptung durchweg positiv beantwortet wurde, gab es doch einige Schüler, die den Versuchsaufbau „etwas windig“ fanden. Die Fragebogenauswertung zeigte in diesem Zusammenhang, dass einige Schüler, wie bereits erwähnt, den Fallturm selbst für etwas zu instabil hielten.



Dieses Problem lässt sich aber leider nicht so einfach lösen. Eine Möglichkeit wäre, den Turm aus stabilen Alurohren fest aufzubauen. Dann ginge aber ein wichtiges Kriterium, nämlich das der guten Transportierbarkeit verloren. Es bleibt aber jedem Lehrer freigestellt, sich für den Turmaufbau eine eigene Lösung einfallen zu lassen.



Ob sich der Aufwand der Erstellung eines Minifallturms lohnt, sollte mit den Aussagen „Ich fand die einzelnen Experimente spannend“ und „Insgesamt habe ich alles gut verstanden“ als Indikatoren dafür, ob die Experimente bei den Schülern gut ankommen, überprüft werden.



Die Experimente stießen insgesamt fast durchwegs auf gute bis sehr gute Resonanz. Und das, obwohl, wie die Fragebögen zeigten, nicht alle Schüler vom Thema „Schwereelosigkeit“ von Haus aus angetan waren.

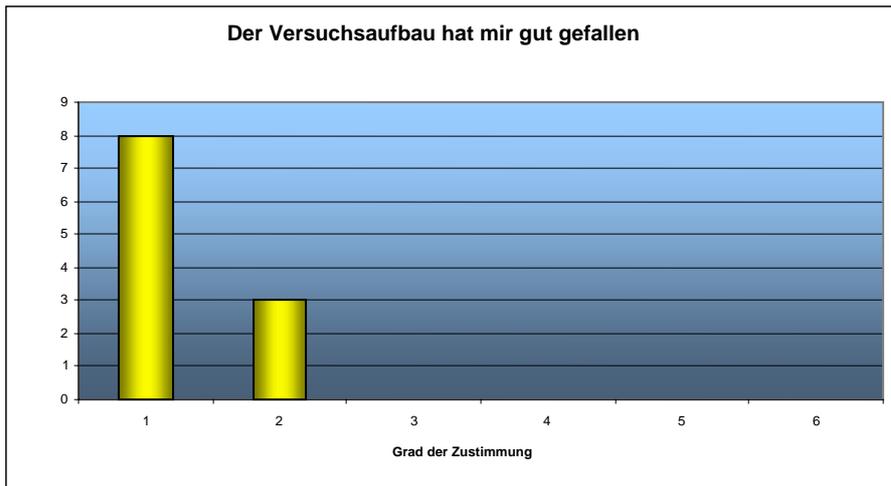


Auch die Selbsteinschätzung der Schüler, wie gut sie das Thema verstanden hätten war sehr positiv. Allerdings gelang es kaum einem der befragten Schüler auf die Frage, was sie sich nach dem Versuch unter Schwerelosigkeit vorstellten, eine zufrieden stellende Antwort zu geben.

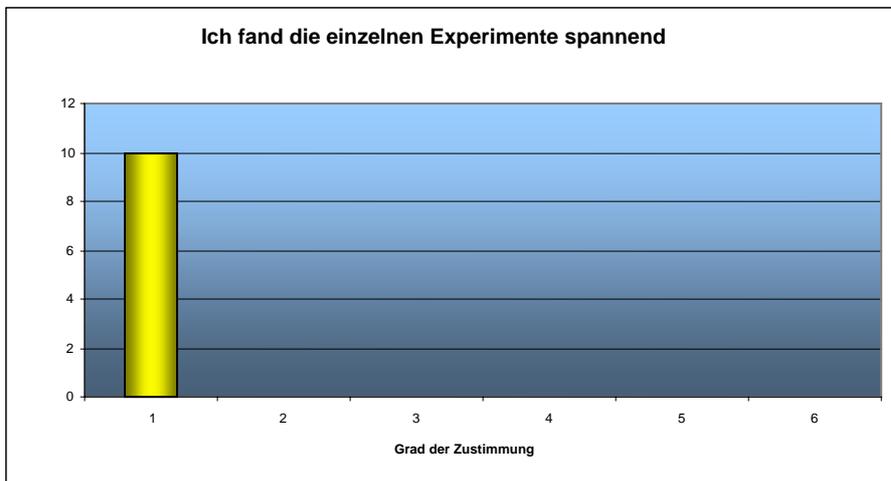
Im oben stehenden Diagramm ist daher auch keinesfalls eine Lernzielkontrolle zu sehen, sondern lediglich die Selbsteinschätzung der Schüler, wie gut sie ihrer Meinung nach mit dem Thema zu recht gekommen sind. Eine positive Selbsteinschätzung kann die intrinsische Motivation Lernender positiv beeinflussen und ist daher von Relevanz dafür, ob Schüler bereit wären, sich eingehender mit einem Thema zu beschäftigen.

5.4.8.2 Ergebnisse der Lehrerbefragung

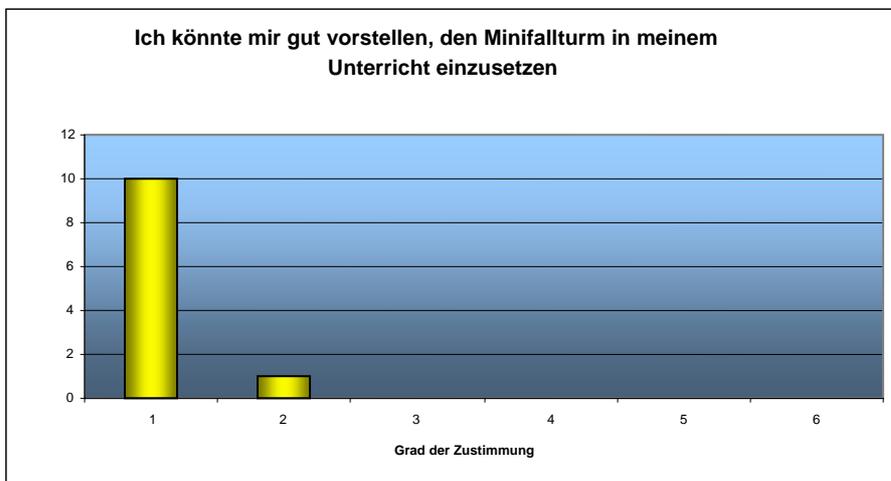
Die in den drei Gruppen befragten elf Physiklehrer und Referendare wurden neben den oben genannten Aussagen zum Aufbau des Minifallturms und zu den einzelnen Experimenten auch darüber befragt, ob sie das Thema Gewichtlosigkeit für relevant für den Physikunterricht hielten.



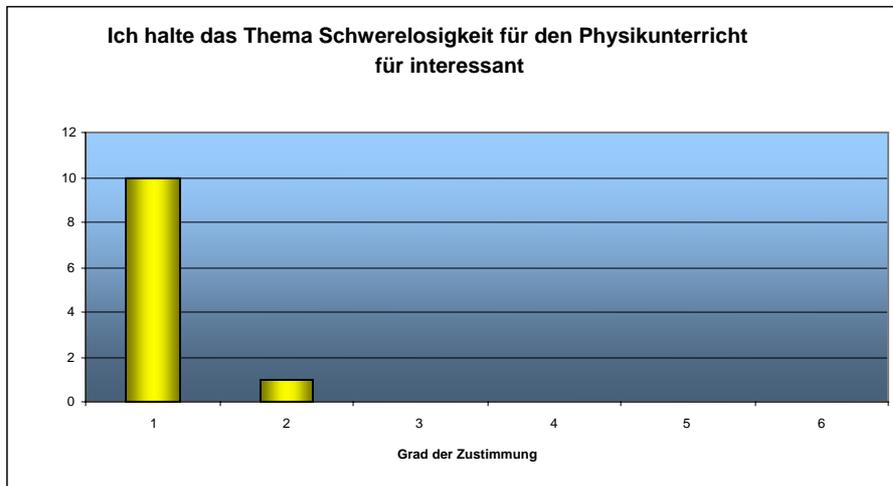
Die befragten Lehrer beurteilten den Aufbau des Minifallturms, sowie die Experimente durchweg positiv.



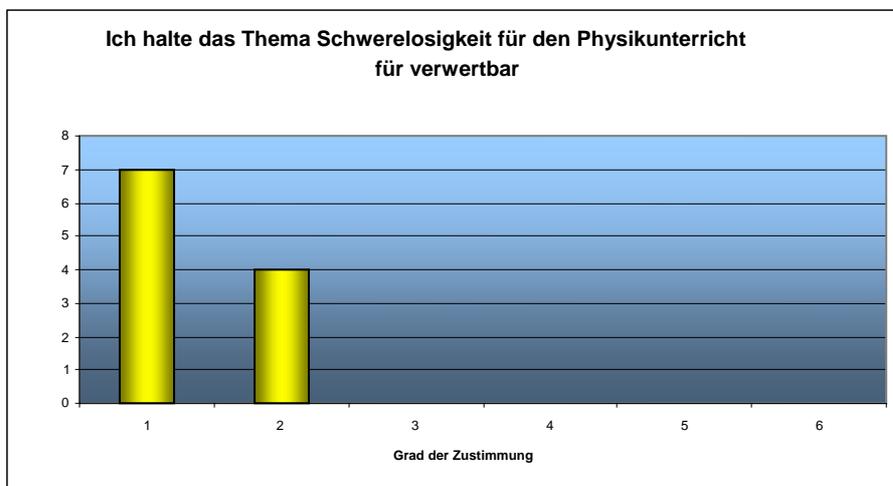
Besonders erfreulich ist, dass zehn der elf Lehrer die einzelnen Experimente offensichtlich sehr spannend fanden. Ein Lehrer enthielt sich hier der Stimme, da er mit dem Begriff „spannend“ nichts anzufangen wusste.



Ebenso erfreulich ist es, dass alle befragten Lehrer sich gut bis sehr gut vorstellen könnten, den Minifallturm in ihrem Unterricht einzusetzen. Da der Minifallturm genau dafür – den tatsächlichen Einsatz im Unterricht – gedacht ist, bekommt dieses Urteil eine besonders wichtige Bedeutung.



Vorraussetzung dafür, ob ein Minifallturm im Physikunterricht eingesetzt wird, ist, dass die betreffenden Lehrer das Thema „Schwerelosigkeit“ als für ihren Unterricht interessant und auch durchführbar halten. Offensichtlich ist das bei allen elf befragten Lehrern der Fall.



Es sei noch erwähnt, dass ich von jeder der drei Lehrergruppen, sowie von verschiedenen anderen Lehrern, die den Minifallturm am Tag der Physiklehrer am 22. Februar 2006 inspizieren konnten, aufgefordert wurde, die einzelnen Komponenten als Bausatz oder als fertig aufgebautes Experiment zu vertreiben. Leider ist mir dies momentan aus Zeitgründen nicht möglich. Die Lehrer wurden aber darauf hingewiesen, dass es in kürze eine Bauanleitung für den Fallturm gibt, anhand derer ein Nachbau relativ einfach möglich ist. Eine solche befindet sich im Anhang dieser Arbeit.

6 Weitere Experimente zum Thema Mikrogravitation

Im Laufe der Entstehung dieser Zulassungsarbeit hatte ich Gelegenheit, mit einer Vielzahl von Lehrern und Wissenschaftlern des DLR über das Thema Mikrogravitation im Physikunterricht zu sprechen. Die dabei entstandenen Ideen möchte ich im Folgenden noch kurz wiedergeben, da ich der Meinung bin, dass einige von ihnen es mit Sicherheit wert sind genannt zu werden.

6.1 Freihandexperimente

Auch wenn die meisten der von mir befragten Lehrer angaben, das Thema Gewichtslosigkeit in ihrem Unterricht nur theoretisch besprochen zu haben, gab es doch einige wenige, die ein paar einfache Freihandversuche kannten. Eine großartige Sammlung geeigneter Experimente, die mit wenig Aufwand realisierbar sind, findet man in „Microgravity: A Teacher’s Guide With Activities in Science, Mathematics, and Technology“, einer von der NASA herausgegebenen Informationsbroschüre. Einige der in dieser Broschüre genannten, sowie weitere, im Laufe der Entstehung dieser Arbeit gesammelten Experimente möchte ich kurz vorstellen.

- Briefwaage:
Ein Schüler hält eine Briefwaage in der Hand, auf der ein Gegenstand liegt und springt damit von einem Tisch. Das Gewicht des Gegenstandes im freien Fall wird gemessen.
- Magnet-Beschleunigungsmesser
Auf einem Rundholzstab sind drei sich gegenseitig abstoßende Magnete aufgefädelt. Lässt man den Stab mit den Magneten von oben nach unten fallen, kann man sehen, dass die Magnete soweit wie möglich auseinander gedrückt werden, da sie nicht mehr durch ihr Gewicht daran gehindert werden. Übrigens eignet sich dieser „Magnet-Beschleunigungsmesser“ hervorragend, um zu zeigen, dass bei einem Parabelflug bereits im aufsteigenden Parabelast

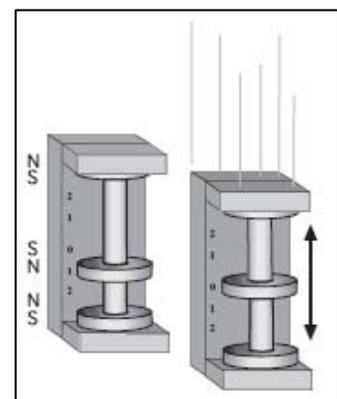


Abbildung 43: Magnet-Beschleunigungsmesser

Gewichtslosigkeit herrscht. Dazu lässt man einfach zwei Schüler sich den Beschleunigungsmesser in hohem Bogen zu werfen. Geeignete Magnete gibt es übrigens bei <http://www.supermagnete.de/magnets.php?group=rings>

- Luftballon

Ein Luftballon wird wie in nebenstehender Skizze abgebildet an einem Holzrahmen befestigt. An zwei Gummiseilen hängt man eine durch einen Holzblock gesteckte Nadel so auf, dass sie in Ruhe durch ihr Eigengewicht nach unten gezogen wird. Lässt man die gesamte Anordnung fallen, so können sich die Gummiseile entspannen und die Nadel wird den Ballon zum Platzen bringen.

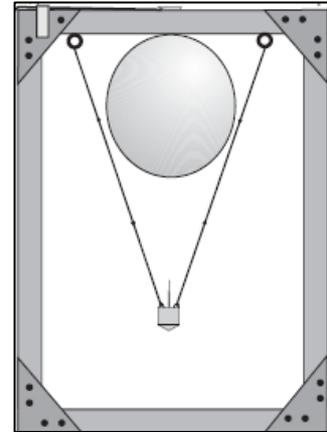


Abbildung 44:
Luftballongravimeter

- Suppe schöpfen

Wenn man Suppe aus einem Topf mit einem Schöpflöffel in einen Suppenteller schöpft, beschreibt man intuitiv eine Parabelbahn, um keine Suppe zu verschütten. Man kann diesen Versuch entweder mit einfacher Beobachtung oder genauer mittels Videoauswertung mit einem geeigneten Programm (zum Beispiel DAVID, Freeware vom Institut für Didaktik der Physik der LMU München³⁶) durchführen.



Abbildung 45:
Mikrogravitation im Alltag

- Aufzug

Ein Schüler stellt sich in einem Aufzug auf eine Personenwaage und misst sein Gewicht in Ruhe und wenn der Fahrstuhl nach oben oder unten beschleunigt.

6.2 Ein fächerübergreifendes Experiment zum Thema Schwerkraft

Im DLR School_Lab in Köln stieß ich auf ein sehr interessantes Experiment zum Thema Schwerkraft. Es beschäftigt sich mit der Frage, woher ein Pantoffeltierchen „weiß“, wo oben und unten ist. Wie im Vorwort zu dieser Arbeit erwähnt, haben Pantoffeltierchen dadurch einen Evolutionsvorteil, dass sie oben von unten unterscheiden können. Die nur etwa 0,3 mm langen Einzeller leben im Wasser von Tümpeln, Seen, Flüssen und Pfützen und ernähren sich

³⁶ <http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Downloads/david/david.htm> (09.06.2006)

von Fäulnisbakterien. Da diese insbesondere an der Wasseroberfläche, in der Nähe von ins Wasser gefallenem Material, wie etwa Laub zu finden sind, ist es für Pantoffeltierchen sinnvoll, möglichst oft oben an der Wasseroberfläche zu sein. Wie aber kann ein Einzeller, der selbstverständlich keine Sinneszellen hat, oben von unten unterscheiden?

Zur Klärung dieser Frage kann folgender Versuch dienen, den übrigens bereits 1889 der deutsche Physiologe Max Verworn³⁷ durchführte: Man untersucht wie sich Pantoffeltierchen in einer Messflasche verhalten und stellt fest, dass sie sich innerhalb kurzer Zeit oben in der Flasche sammeln. Die Frage, warum sie das tun, kann sehr gut als anschauliches Beispiel verwendet werden, wie man eine wissenschaftliche Hypothese sinnvoll testen kann; denn neben der Annahme, dass sich die Pantoffeltierchen nach der Schwerkraft ausrichten, könnte man genauso gut denken, dass sie vom sauerstoffreicheren Wasser an der Oberfläche der Flasche angezogen werden oder auf Grund der Lichtverhältnisse nach oben schwimmen.

Daher sollte man den Versuch mit unterschiedlichen Äußeren Bedingungen durchführen: Zum Beispiel kann man die Lichtverhältnisse verändern oder die Flasche mit einem luftdurchlässigen aber wasserundurchlässigen Verschluss schließen und beobachten, ob die Pantoffeltierchen, wenn man die Flasche umdreht nach unten zum sauerstoffreichen Wasser schwimmen.

Man wird feststellen, dass die Pantoffeltierchen auch unter geänderten Bedingungen weiterhin nach oben schwimmen. Davon kann man zwar noch nicht mit Sicherheit ableiten, dass sie sich an der Schwerkraft ausrichten – es könnten immer noch andere, nicht berücksichtigte Effekte eine Rolle spielen – aber man kann die Annahme doch in gewisser Weise erhärten, da man weiß, dass andere untersuchte Größen offenbar keinen Einfluss haben.

Wie aber können Einzeller ohne Sinneswahrnehmung „wissen“ wo oben ist? Ein nahe liegender Ansatz wäre, zu denken, dass sie ganz einfach

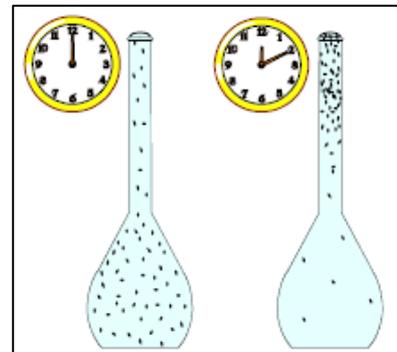


Abbildung 46: Pantoffeltierchen steigen auf

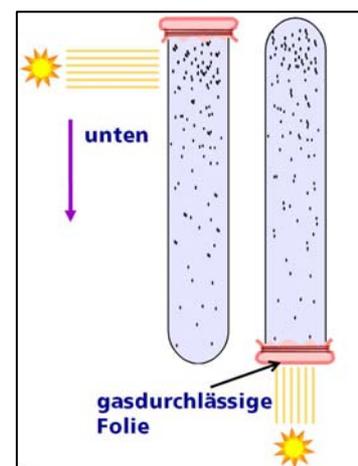


Abbildung 47: Ausschluss anderer Einflussgrößen

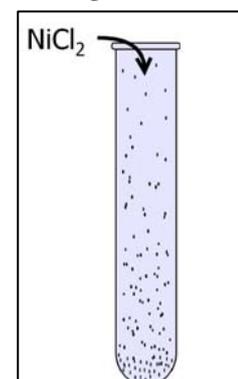


Abbildung 48: NiCl₂ lähmt die Pantoffeltierchen

³⁷

http://www.schoollab.dlr.de/Schoollab/Koeln_Porz/Experimente/Gravitationsbiologie/Experiment/experimentbeschreibung_gravitationsbiologie.pdf (23.05.2006)

weniger Dichte haben als Wasser und daher eine Auftriebskraft erfahren. Dann müssten aber auch gelähmte oder tote Pantoffeltierchen nach oben schwimmen. Um dies zu überprüfen, kann man ein wenig Nickelchlorid in das Wasser geben, und damit die Pantoffeltierchen lähmen. Man wird feststellen, dass die gelähmten Pantoffeltierchen auf den Grund des Gefäßes sinken, also eine größere Dichte als Wasser haben und somit gegen die Schwerkraft ankämpfen müssen, um nach oben zu kommen.

Bis hierhin ist der Versuch mit einfachen Mitteln mit Schülern ab der fünften Klasse durchführbar. Wenn man ganz genau wissen möchte, wie der Mechanismus funktioniert, mit dem die Pantoffeltierchen nach oben schwimmen, muss man ungleich mehr Aufwand betreiben. Tatsächlich ist der Mechanismus, der Pantoffeltierchen antreibt, nach oben zu schwimmen, recht komplex und nur sehr aufwändig zu bestätigen.

Er beruht darauf, dass das Innenleben dieser Einzeller in Bezug auf die Dichte nicht homogen ist. Die dichteren Zellbestandteile sinken, wenn das Pantoffeltierchen nach oben schwimmt zu dessen Hinterseite hin ab. Schwimmt es nach unten, sinken sie zu seiner Vorderseite. Pantoffeltierchen besitzen an ihrer Vorder- beziehungsweise Hinterseite „Rezeptoren“, die, wenn sie mechanische Reize erfahren, für ein Verlangsamen, beziehungsweise Beschleunigen des Pantoffeltierchens sorgen. Steigen sie auf, so drückt der Zellinhalt auf die Rezeptoren auf der Hinterseite und das Pantoffeltierchen bewegt sich schneller fort. Schwimmt es hingegen nach unten, so schwimmt es langsamer. Daraus resultiert, dass das Pantoffeltierchen prinzipiell schneller nach oben als nach unten schwimmt.

Dieses Verhalten ist allerdings nur statistisch, also nicht am einzelnen Pantoffeltierchen überprüfbar. Wertet man die Bewegung vieler Pantoffeltierchen entsprechend aus, so lässt sich in der Tat bestätigen, dass sich nach oben bewegende Pantoffeltierchen schneller bewegen als solche, die nach unten schwimmen.

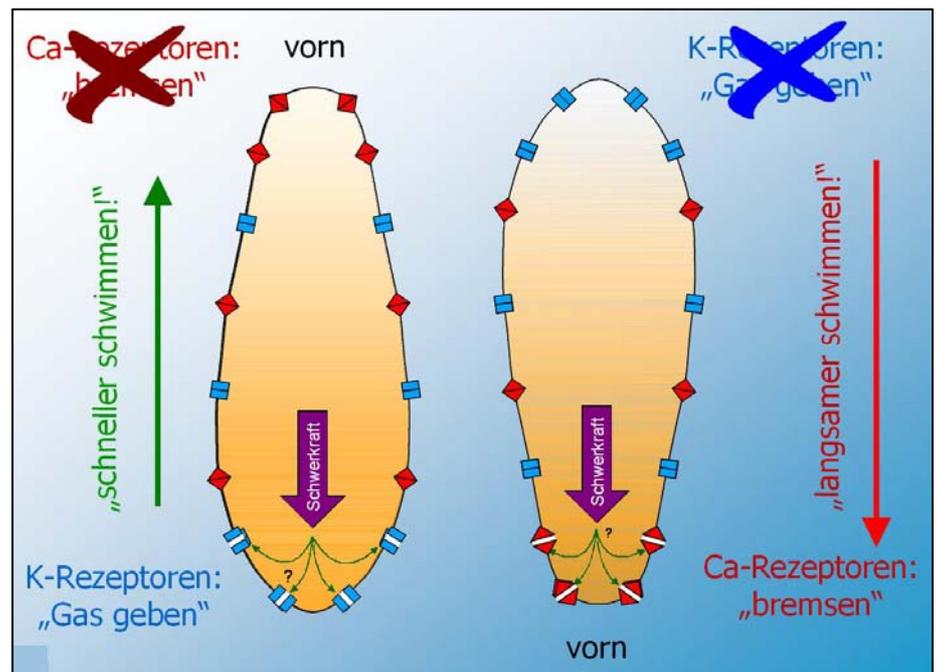


Abbildung 49: Mechanismus der Gravitaxis von Pantoffeltierchen

Aber auch wenn man mit in der Schule verfügbaren Mitteln nicht zu diesem Ergebnis kommen kann, ist der Versuch, wenn man ihn auf die oben beschriebenen ersten Schritte beschränkt, sehr interessant und dann eben auch einfach durchzuführen. Man benötigt lediglich die folgenden Materialien:

- Experimentierflasche, möglichst nach oben hin dünner werdend
- Pantoffeltierchen aus dem Aquarienfachhandel
- Pipette
- Gasdurchlässiger Verschluss für die Flasche
- Evian-Mineralwasser
- Evtl. Nickelchlorid NiCl_2 aus der Apotheke

Zur Versuchsdurchführung ist folgendes noch ergänzend zu erwähnen:

In die Experimentierflasche gibt man am besten Evian-Mineralwasser, da sich die Pantoffeltierchen darin wohl fühlen und daher besser beobachtbar sind, als wenn sie „aufgeschreckt“ umherschwimmen. Man pipettiert die Pantoffeltierchen aus ihrem Aufbewahrungsgefäß sinnvollerweise nahe der Oberfläche ab und gibt sie vorsichtig in die wassergefüllte Experimentierflasche. Bereits nach wenigen Minuten kann man sehen, wie sich die Pantoffeltierchen nach oben hin sammeln.



Wenn der Aspekt der gelähmten Pantoffeltierchen noch untersucht werden soll, so ist es wichtig zu wissen, dass Pantoffeltierchen sehr sensibel auf NiCl_2 reagieren und daher die Experimentierflasche nach dem Versuch für die nächsten Male äußerst gründlich zu reinigen ist. Keinesfalls dürfen die mit dem NiCl_2 gelähmten Pantoffeltierchen in den Behälter, in dem sich die restlichen Pantoffeltierchen befinden zurückgegeben werden.

Des Weiteren ist auf die Gefahrenrichtlinien zu achten, da NiCl_2 gesundheitsschädlich ist und auch nicht in die Kanalisation gelangen darf. Insgesamt ist der zu beobachtende Effekt, dass Pantoffeltierchen eine größere Dichte aufweisen als Wasser, meiner Meinung nach nicht so spannend, dass er den doch beträchtlichen Mehraufwand beim Einsatz des NiCl_2 rechtfertigen würde – ich würde diesen Teil daher weglassen.

7 Abschließende Bemerkungen

Nachdem der hier vorgestellte Minifallturm inzwischen mit über fünfzig Schülern und Lehrern getestet wurde, ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- 1) Der Minifallturm und alle getesteten Experimente funktionieren.
- 2) Anfängliche Bedenken in Bezug auf die Stabilität der Fallbox und der anderen Komponenten haben sich nicht bestätigt – trotz intensivem Einsatz sind bis zum heutigen Tage keine Abnutzungserscheinungen sichtbar geworden
- 3) Der Minifallturm macht Spaß: Alle befragten Schüler und Lehrer fanden die Experimente spannend und den Versuchsaufbau gut – sogar so gut, dass ich mehrfach von Lehrern aufgefordert wurde, den Minifallturm in Kleinserie zu vertreiben.
- 4) Es gibt viele weitere Experimentiermöglichkeiten für den Minifallturm.
- 5) Es ist mit geringem Aufwand möglich, das Thema Mikrogravitationsforschung im Physikunterricht umzusetzen – und das nicht nur theoretisch.

Insgesamt bin ich der Meinung, dass ein Minifallturm für jede Physiksammlung eine Bereicherung darstellen würde. Einer der von mir befragten Lehrer meinte auf meine Frage, ob er die Anschaffungskosten von etwa € 150,- für einen Minifallturm für gerechtfertigt halte: „Wir geben oft viel mehr Geld für wesentlich unsinnigere Geräte aus.“

Dementsprechend hoffe ich, dass die in diese Arbeit investierte Zeit auch für den einen oder anderen Schüler oder Lehrer von Nutzen sein wird. Mir persönlich hat sie neben vielen neuen Erfahrungen, erwähnt sei hier nur die Entwicklung einer Sensorschaltung für Beschleunigungen nebst entsprechendem Platinenlayout, auch sehr viel Freude bereitet.

7.1 Verzeichnis der verwendeten Literatur

Hammer, 1994: Physikalische Formeln und Tabellen. 6. Auflage, München, J. Lindauer Verlag, 102 S.

Mietzel Gerd, 2003: Pädagogische Psychologie des Lernens und Lehrens. 3. Auflage, Hofgrefte Verlag, Göttingen, 494 S.

Paul A. Tipler, Ralph A. Llewellyn, 2002: Moderne Physik. 1. Auflage, Oldenbourg Verlag, 964 S.

G. Seibert et al., 2001: A world without gravity. 1. Auflage, Norwijk NL, European Space Agency, 495 S.

M. Rogers, M. Wargo (1997): The Microgravity Demonstrator. Internet:
http://neurolab.nasa.gov/er/seh/Microgravity_Demonstrator.pdf (09.06.2006)

M. Rogers, G. Vogt, M. Vargo (1997): Microgravity: A teacher's guide with activities in science, mathematics and technology. Internet:
<http://quest.nasa.gov/space/teachers/microgravity/Micro.pdf> (09.06.2006)

Matthias Bartelmann, o.J.: Theoretische Physik I: Mechanik, Skript zur Vorlesung

o.V., o.J.: Educational Brief. Microgravity: Fall Into Mathematics Internet:
<http://virtualastronaut.jsc.nasa.gov/teacherportal/pdfs/FallintoMathematics.pdf> (09.06.2006)

Internetadressen:

<http://www.dlr.de>

<http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptseite>

<http://www.ptb.de/de/wegweiser/infoszurzeit/index.html>

http://www.dlr.de/Schoollab/Koeln_Porz/Experimente/Gravitationsbiologie/Experiment/experimentbeschreibung_gravitationsbiologie.pdf

http://de.wikipedia.org/wiki/Josef_von_Copertino

<http://www.oregonvortex.com/>

http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph11/geschichte/02newton/newton.htm

<http://www.isb.bayern.de/isb/download.asp?DownloadFileID=c0d7ef7d0f1980b221720e61ad6ee25d>

http://www.physik.uni-regensburg.de/didaktik/gem_Mat/Schuelervorst/Grundbegr_%20Mechanik.pdf

<http://lexikon.astronomie.info/satelliten/julesverne/index.html>

<http://www.ita.uni-heidelberg.de/~msb/Lectures/mechanik/mechanik.pdf>

http://schoollab.tu-harburg.de/inhalte/wissen/flyer_wind.pdf

<http://www.deckers-online.de/index.html>

http://www.novespace.fr/VEnglish/welcome_a.html

http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-667/1157_read-2972/

http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-1/86_read-3130/

http://www.dsg.uni-paderborn.de/_pdf/smi_material/787-0.pdf

<http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/d32/32c.htm>

<http://nobelprize.org/physics/laureates/1997/press.html>

http://www.ptb.de/de/org/4/44/441/_index.htm

http://neurolab.nasa.gov/er/seh/Microgravity_Demonstrator.pdf

www.minifallturm.de

<http://www.videolan.org/vlc/>

<http://www.supermagnete.de/magnets.php?group=rings>

<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/Downloads/david/david.htm>

http://www.schoollab.dlr.de/Schoollab/Koeln_Porz/Experimente/Gravitationsbiologie/Experiment/experimentbeschreibung_gravitationsbiologie.pdf

<http://ola.cti.ac.at/velo/KMP/KMP-2.htm>

7.2 Abbildungsverzeichnis

Im Folgenden sind die Quellen aller in dieser Arbeit verwendeten Abbildungen, sowie die entsprechenden Seiten aufgelistet. Wenn keine Quelle genannt ist, stammt das Bild vom Autor.

Abbildung 1: Tom Hanks im Film Apollo 13	
Quelle: http://www.poptertainment.com/Apollo13%20Box%20Art%20front.jpg	
(26.06.2006)	10
Abbildung 2: Erster Lagrangepunkt	11
Abbildung 3: Freier Fall aus geringer Höhe, ohne Luftwiderstand	13
Abbildung 4: Fallbeschleunigung ohne (rot) und mit (blau) Luftwiderstand	16
Abbildung 5: Möglichkeiten der Erzeugung von Mikrogravitation.....	18
Abbildung 6: Der Fallturm in Bremen	
Quelle: http://www.zarm.uni-bremen.de/	
Stand 09.06.2006.....	19
Abbildung 7: Ablauf eines Parabelfluges	
Quelle: http://www.dlr.de/rd/fachprog/fuw/fp/para/flight_campaign	
Stand 09.06.2006.....	20
Abbildung 8: Flugbahnen von sounding rockets	
Quelle: http://www.dlr.de/rd/fachprog/fuw/fp/sr/texas40_ge.html	
Stand 09.06.2006.....	21
Abbildung 9: Forschungsmodul COLUMBUS	
Quelle: http://www.dlr.de/rd/fachprog/raumstation/ESAProjekte/columbus_ge.html	
Stand 09.06.2006.....	21
Abbildung 10: Größenvergleich von Mensch, Giraffe und Dinosaurier	
Quelle: A world without gravity S. 36	22
Abbildung 11: Trainingsgerät zur Steigerung der Schnellkraft	
Quelle: A world without gravity S. 79	23
Abbildung 12: Reaktion eines Keimlings auf den Schwerereiz	
Quelle: A world without gravity S. 121	26
Abbildung 13: Verhalten von Keimlingen unter Mikrogravitation, nachdem sie für 22 Minuten einen Beschleunigungsreiz von 1g erfahren haben	

Quelle: A world without gravity S. 128	26
Abbildung 14: Hochreiner Siliziumkristall	
Quelle: http://de.wikipedia.org/wiki/	
Bild:Monokristalines_Silizium_f%C3%BCr_die_Waferherstellung.jpg	
Stand 09.06.2006.....	28
Abbildung 15: Normale und Marangoni Konvektion	
Quelle: A world without gravity S. 173	29
Abbildung 16:Simulation der Temperaturverteilung beim Guss eines Motorblocks	
Quelle: A world without gravity S. 187	30
Abbildung 17: Der Kolbeneffekt.....	31
Abbildung 18:Geschwindigkeitsverteilung eines Bose-Einstein-Kondensats aus Rubidium Atomen	
Quelle: A world without gravity S. 296	33
Abbildung 19: Aufbau der CSF1 der PTB in Braunschweig	
Quelle: http://www.ptb.de/de/org/4/44/441/fontaene.htm	
Stand 09.06.2006.....	33
Abbildung 20: Lehreranleitung der Nasa	
Quelle: http://neurolab.nasa.gov/er/seh/Microgravity_Demonstrator.pdf	
Stand 09.06.2006.....	35
Abbildung 21: Der käufliche Minifallturm im DLR School_Lab in Köln	
Quelle: http://www.dlr.de/Schoollab/Koeln_Porz/Experimete/Fallturm/Fotos	
Stand 09.06.2006.....	36
Abbildung 22: Die Fallbox.....	36
Abbildung 23: Ein möglicher Fallturmaufbau	37
Abbildung 24: Aufhängung mit Elektromagnet.....	38
Abbildung 25: Magnetgravimeter	
Quelle: http://www.dlr.de/Schoollab/Koeln_Porz/Experimete/Fallturm/Fotos	
Stand 09.06.2006.....	38
Abbildung 26: Aufbau: Systemcheck	39
Abbildung 27: Aufbau: Briefwaage	40
Abbildung 28: Sanduhr	41
Abbildung 29: Auftrieb	42
Abbildung 30: Schematischer Aufbau des Experiments: "Auftrieb"	42
Abbildung 31: Bilderfolge: Auftrieb.....	43

Abbildung 32: Bilderfolge: Auftrieb alt.....	44
Abbildung 33: Verbrennung.....	45
Abbildung 34: Bilderfolge: Verbrennung	46
Abbildung 35: Pendel.....	47
Abbildung 36: Bilderfolge: Pendel am oberen Totpunkt.....	48
Abbildung 37: Bilderfolge: Pendel im unteren Durchgang	49
Abbildung 38: Kapillarwirkung	
Quelle: http://www.minifallturm.de/html/mft-experimente.html	
Stand 09.06.2006.....	50
Abbildung 39: Die erste Schülergruppe	51
Abbildung 40: Die zweite Schülergruppe	52
Abbildung 41: Auswertung der Experimente am PC.....	55
Abbildung 42: Kurz vor dem Auslösen des freien Falls	56
Abbildung 43: Magnet-Beschleunigungsmesser	
Quelle: http://quest.nasa.gov/space/teachers/microgravity/Micro.pdf	
Stand 09.06.2006.....	63
Abbildung 44: Luftballongravimeter	
Quelle: http://quest.nasa.gov/space/teachers/microgravity/Micro.pdf	
Stand 09.06.2006.....	64
Abbildung 45: Mikrogravitation im Alltag	
Quelle: http://www.minifallturm.de/html/mg-im_alltag.html Stand	
09.06.2006.....	64
Abbildung 46: Pantoffeltierchen steigen auf.....	65
Abbildung 47: Ausschluss anderer Einflussgrößen	65
Abbildung 48: NiCl ₂ lähmt die Pantoffeltierchen.....	65
Abbildung 49: Mechanismus der Gravitaxis von Pantoffeltierchen	
http://www.dlr.de/Schoollab/Koeln_Porz/Experimente/Gravitationsbiologie/Experiment/experimentbeschreibung_gravitationsbiologie.pdf	
Stand 09.06.2006.....	66

Danksagung

Ich danke Herrn Dr. Hausamann, dem Leiter des DLR School_Lab in Oberpfaffenhofen für seine Unterstützung und insbesondere für die Möglichkeit, den Minifallturm im Rahmen des School_Lab - Betriebs zu testen, sowie Dipl. Ing. Robin Gruber und meinem Stiefvater Dipl. Ing. Peter Groll für deren Hilfe bei der Erstellung der Mikrogravitationsampel. Meiner Mutter, Birgit Groll, danke ich für ihre Hilfe bei der redaktionellen Überarbeitung.

Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Dr. Bräucker, dem Leiter des DLR School_Lab in Köln für die überaus hilfreichen Anregungen, insbesondere in Bezug auf das Thema Gravitationsbiologie, aber auch Mikrogravitation im Allgemeinen.

Zu guter Letzt möchte ich Herrn StR. Hopf für seine geduldige und jederzeit hilfsbereite und ideenreiche Betreuung danken.

Erklärung gemäß LPOI §30(6)

Ich, Tobias Schüttler, versichere, dass ich diese Arbeit selbst verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe. Alle Zitate sind im Text hinreichend kenntlich gemacht und die verwendete Literatur ist angegeben.

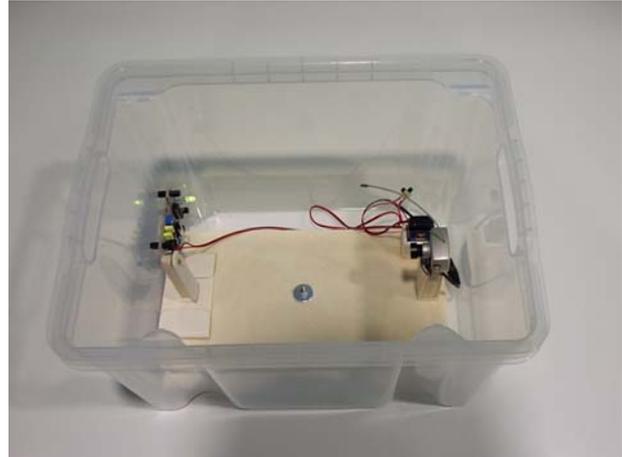
Ort/Datum

Tobias Schüttler

8 Anhang

8.1 Aufbau der Fallbox

Mit ein wenig handwerklichem Geschick lässt sich die Fallbox in etwa zwei Tagen bauen. Alles, was man dazu benötigt, findet man in der Werkzeug- und Stückliste.



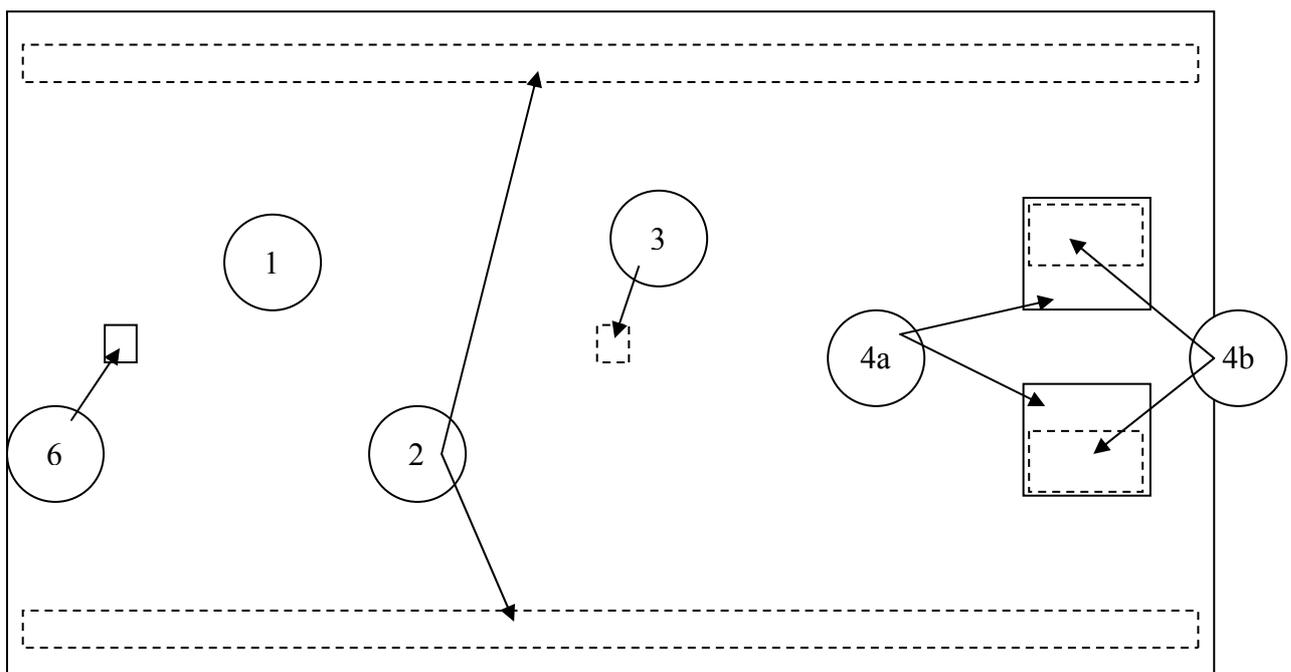
Im Folgenden geben in Klammern stehende Zahlen – zum Beispiel (17) – die entsprechende Stücklistennummer eines Bauteiles an.

8.1.1 Allgemeines

Alle Verklebungen können, wenn nicht anders erwähnt mit Sekundenkleber vorgenommen werden.

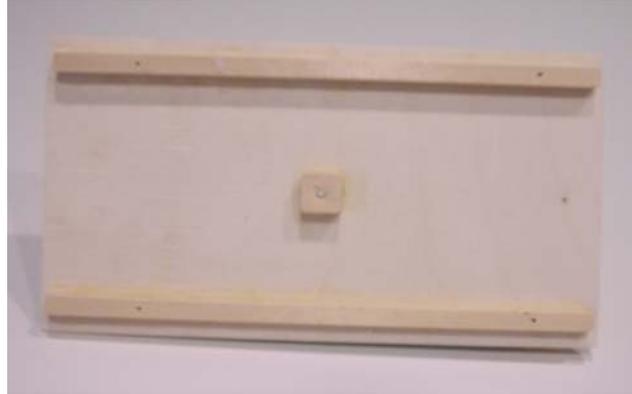
Zum Sägen der Holzteile verwendet man am besten eine Laubsäge.

Übersicht:



8.1.2 Aufbau der Fallbox

1. Die Experimentierplattform (1) wird aus Flugzeugsper Holz ausgesägt und mit den Verstärkungsleisten (2) nach Plan verklebt. Der Abstand zu den Rändern der Experimentierplattform beträgt 1,5 cm. Die Schraubverstärkung (3) mittig einkleben.

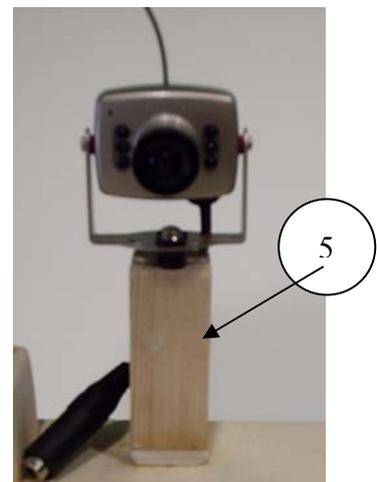


2. Die Experimenthalterungen (4) werden aus den Teilen (4a) und (4b) zusammengeklebt und auf die Experimentierhalterung aufgeklebt. Hierbei ist darauf zu achten, dass sich die Experimentfüße (19) saugend unter die Experimenthalterung schieben lassen (erst überprüfen, dann festkleben).

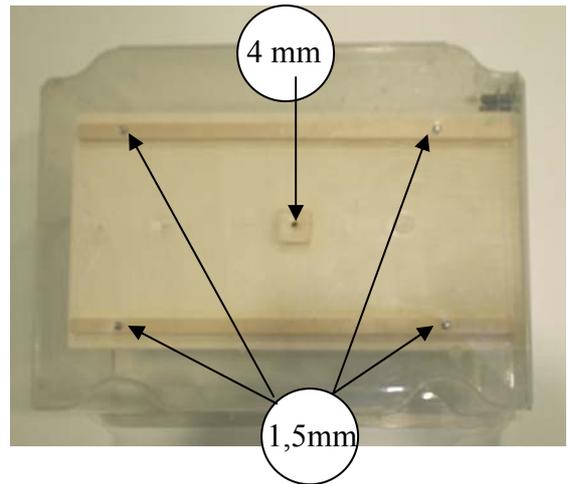


3. Die Kamerahalterung (5) mittig und in etwa 1 cm von der Rückseite der Experimentierplattform entfernt gegenüber den Experimenthalterungen aufkleben. **Achtung:** auf gute Klebeverbindung achten!

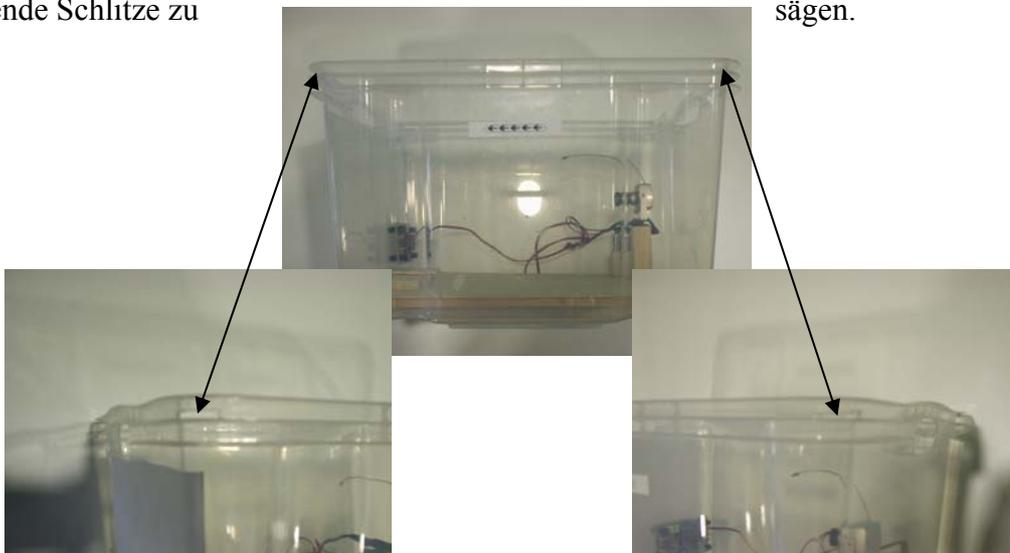
Neben der Kamera kann man für die Batterie der Kamera und der Mikrogravitationsampel optional eine Befestigungsbox aus Sperrholzresten bauen (vgl. Bild 2). Ebenso gut kann man hierfür aber auch eine Befestigung mittels Klettband verwenden.



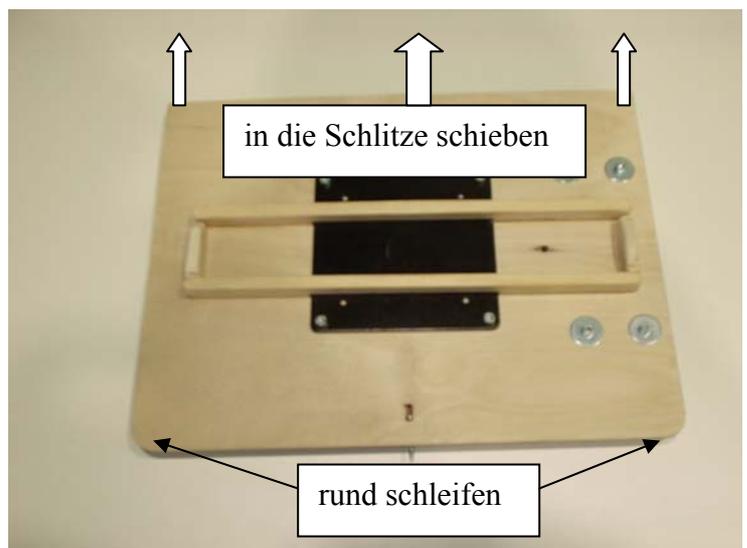
4. Platzieren Sie die Experimenthalterung mittig in der Fallbox und bohren Sie für die Befestigungsschrauben (7) und (10) entsprechende Löcher (4 mm beziehungsweise 1,5 mm) durch die Fallbox und die Schraubverstärkung beziehungsweise in die Verstärkungsleisten. Verschrauben Sie die Experimentierhalterung mit den entsprechenden Schrauben.



5. Zur Aufnahme des Deckels (13) sind in die Fallbox auf einer Seite in die Ecken passende Schlitzte zu sägen.



Den Deckel in diese Schlitzte schieben und auf der gegenüberliegenden Seite der Form der Box entsprechend verschleifen, so dass er die Fallbox möglichst gut verschließt.



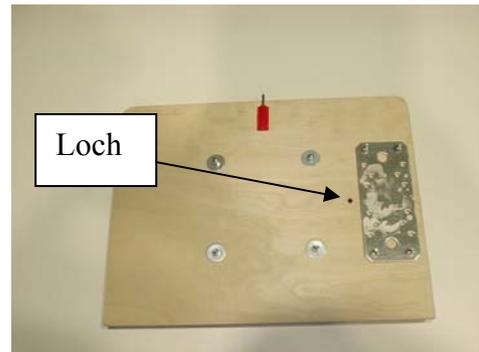
6. Den Hitzeschutz (16) von unten an den Deckel schrauben. Dabei ist zu beachten, dass der Hitzeschutz wie auf dem Bild weit rechts, also später direkt über den Experimenten angebracht ist.

Schlitz für die Verriegelung (14) sägen und

Verriegelung so auf die Unterseite des Deckels kleben, dass der Verriegelungshebel auf der Oberseite des

Deckels ist. **Vorsicht!** Beim Ankleben der Verriegelung ist darauf zu achten, dass kein Sekundenkleber in den Verriegelungsmechanismus fließt und diesen später blockiert!

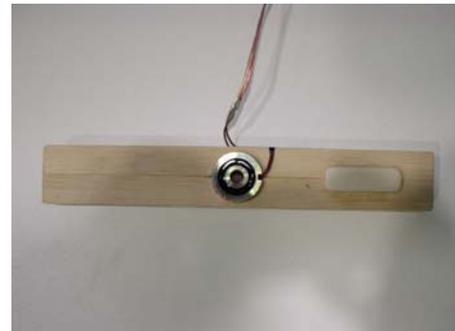
Im Abstand von 70 mm vom Rand des Deckels mittig ein Loch (5 mm) für den Rundholzstab des Experiments „Auftrieb“ bohren



7. Die Befestigungsplatte (15) auf die Oberseite des Deckels schrauben. Die Führung (17) für die Halterung des Elektromagneten wird erst angeklebt, wenn die Halterung fertig gestellt ist.

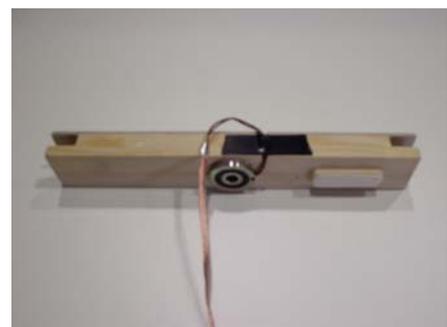


8. Die Halterung für den Elektromagneten wird aus zwei 20x20 mm Kieferleisten hergestellt. In diese wird mittig jeweils eine halbkreisförmige Aussparung geraspelt beziehungsweise gefeilt, so dass der Elektromagnet saugend in die zusammengesetzte Halterung passt. Alternativ kann man die Kieferleisten auch zusammenkleben und mit einem entsprechend großen Kernlochbohrer die Aufnahme für den Elektromagneten nachträglich herausbohren.



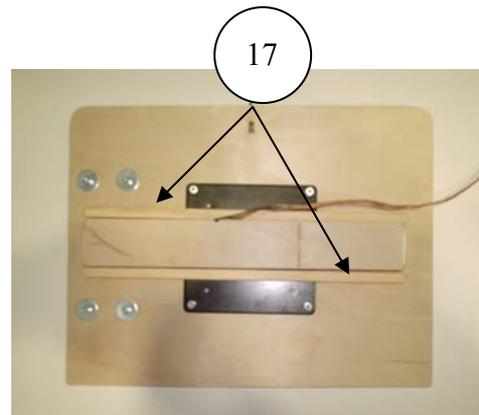
9. Der Elektromagnet wird mit 5-Minuten-Epoxidharz so in die Halterung geklebt, dass er auf der Unterseite etwa 3 mm übersteht.

Die restliche Gestaltung der Magnethalterung richtet sich nach der verwendeten Aufhängung. Im vorliegenden Fall wurde die Halterung auf der Oberseite 10 mm tief und 15



mm breit ausgespart und oben mit einem Sperrholzbrettchen verschlossen. Auf diese Art ist es möglich, die Halterung an zwei parallel laufenden Stativstangen aufzuhängen.

Die Führung (17) für die Halterung des Elektromagneten so auf den Deckel der Fallbox kleben, dass die Halterung mit etwa 1 mm Spiel auf jeder Seite hineinpasst. Die Halterung soll von der Führung „eingezäunt“ werden.



8.1.3 Aufbau der Experimente

Die einzelnen Experimente werden auf Sperrholzplatten, den Experimentfüßen (19) aufgeklebt und dann, leicht auswechselbar, in die Experimenthalterung geschoben.

8.1.3.1 Experiment „Briefwaage“

Die Waage (22) wird mit 5-Minuten-Epoxidharz auf eine entsprechend zugeschnittene 20x20 mm Kieferleiste geklebt, welche wiederum auf einen Experimentfuß (19) geklebt wird. Der Experimentierfuß muss sich nun saugend in die Experimenthalterung schieben lassen.



8.1.3.2 Experiment „Sanduhr“

Die Sanduhr (23) wird mit 5-Minuten-Epoxidharz auf ein Sperrholzbrettchen 25x50x5 mm und dieses dann auf einen Experimentfuß geklebt.



8.1.3.3 Experiment „Auftrieb“

Auf einen Experimentfuß ein 25x50x6 mm großes Sperrholzbrettchen kleben und das Kunststoffgefäß (24) so mit einer Befestigungsschraube (1) darauf festschrauben, dass der Schraubenkopf vollständig versenkt ist. Hierzu ist es notwendig, die Bohrung für die Schraube oben etwas zu erweitern. Abgedichtet wird die Verschraubung mit Unterlegscheiben (9) und Gummiringen (12).



4 mm Buchenrundholz(25) auf etwa 20 cm Länge zuschneiden und auf einer Seite mit einem Messer anspitzen. In die Styroporkugel (26) hineinbohren und mit 5-Minuten-Epoxidharz fixieren. Der Buchenrundholzstab muss nun noch exakt abgelängt werden. Dazu das Auftriebs-Experiment in die Experimenthalterung schieben und den Rundholzstab durch das Loch im Deckel der Fallbox führen. Der Stab soll so lang sein, dass er, wenn sich die Styroporkugel am Boden des Gefäßes befindet gerade noch etwa 1 mm oben aus dem Deckel der Fallbox herauschaut.



8.1.3.4 Experiment „Verbrennung“

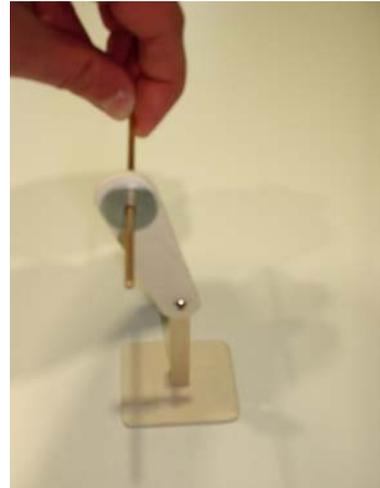
Auf einen Experimentfuß mittig ein 10x20x20 mm großes Kiefernleistenstück kleben. Von unten exakt in der Mitte einen Nagel (27) durch den Experimentfuß und die Kiefernleiste schlagen und gut im Experimentfuß versenken, so dass sich dieser in die Experimenthalterung schieben lässt. Auf den Nagel wird eine auf etwa 10 cm gekürzte Haushaltskerze gesteckt und mit etwas Wachs befestigt.



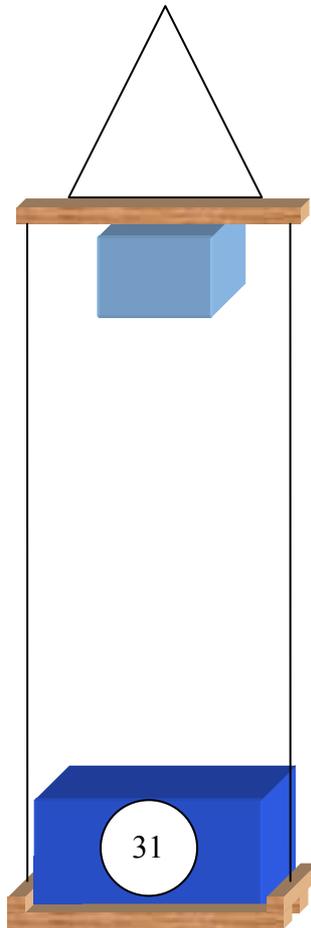
8.1.3.5 Experiment „Pendel“

Aus Sperrholz einen etwa 80 mm langen Pendelkörper aussägen und oben mittig mit 2,5 mm durchbohren. An der Unterseite als Schwungmasse zwei der Unterlegscheiben (9) ankleben. Den Pendelkörper entlang der Bohrung der Unterlegscheiben mit 4 mm durchbohren, so dass man den Kupferstab (28) hindurch schieben kann.

Den Befestigungssockel (29) des Pendels von unten mit einer Befestigungsschraube (11) an einem Experimentfuß anschrauben und den Schraubenkopf im Experimentfuß versenken, so dass sich dieser in die Experimenthalterung schieben lässt. Den Pendelkörper mit einer Befestigungsschraube leicht beweglich am Befestigungssockel aufhängen. Damit das Pendel frei schwingen kann ist es notwendig, als Distanzhalter einige kleine Unterlegscheiben (30) zwischen Pendel und Befestigungssockel auf die Schraube aufzufädeln.



8.1.4 Aufbau des Turmes



Als Turm eignet sich prinzipiell jede etwa zwei Meter hohe Erhebung, wie man sie z.B. aus Stativmaterial herstellen kann. Ein solcher Aufbau ist jedoch sehr zeitaufwändig und auch nicht sonderlich stabil. Der nebenstehende Aufbau hat sich hingegen bewährt.

Um die Auffangbox (31) herum wird aus Kieferleisten ein Rahmen(32) gebaut. Dieser muss saugend an der Box anliegen. An dem Rahmen werden zwei etwa 2m lange Drachenschnüre befestigt. Diese werden an der

anderen Seite, wie in der Skizze zu sehen, mit der Aufhängung (33) verbunden. Es ist darauf zu achten, dass die Schnüre exakt gleich lang sind, da die Aufhängung sonst schief ist.

Die Aufhängung wird mit Drachenschnur an einem Haken in der Zimmerdecke befestigt. An der Aufhängung kann nun die Halterung des Elektromagneten befestigt werden. Idealerweise verwendet man hierzu eine Schraubverbindung.

Um den Fall der Fallbox sanft zu bremsen, kann man, wie im Bild zu sehen, an Spannseilen ein Fangtuch befestigen. Fällt nun die Box ins Fangtuch, so werden die Spannseile durch relativ enge Löcher gezogen und die Bewegungsenergie in Reibungshitze in den Seilen umgewandelt.

Alternativ kann man auch ein Federkissen in die Box legen. Dieses hat den Vorteil, bei weniger Aufwand den Fall sanfter zu bremsen, aber den Nachteil, relativ viel Platz einzunehmen.

8.1.5 Benötigte Werkzeuge

- Laubsäge
- Schlitzschraubenzieher
- Kreuzschlitzschraubenzieher
- Sekundenkleber
- 5-Minuten-Epoxidharz
- Schleifpapier: Körnungen 80 und 200, evtl. noch feiner fürs Finish
- Schleifklotz
- Rundraspel
- Rundfeile
- Holzbohrer 1,5mm und 4mm, evtl. Kernlochbohrer \varnothing 25 mm für Elektromagnet
- Bohrmaschine oder Handbohrer
- Cutter-Messer
- Schraubzwinde

8.1.6 Stückliste

Nummer	Bezeichnung	Material	Größe [mm]	Anzahl
1	Experimentierplattform	Flugzeugsperrholz	280x150x3	1
2	Verstärkungsleisten	Kieferleiste	10x10x270	2
3	Schraubverstärkung	Kiefer	20x20x10	1
4a	Experimenthalterung(1)	Flugzeugsperrholz	50x30x3	2
4b	Experimenthalterung(2)	Flugzeugsperrholz	50x15x3	2
5	Kamerahalterung	Kieferleiste	20x20x50	1
6	Fallbox	Kunststoff	343x270x210	1
7	Befestigungsschraube(1)	Eisen	M4x25	10
8	Mutter für Befestigungsschraube(1)	Eisen	M4	10
9	Unterlegscheibe	Eisen	innen Ø : 4,2 außen Ø : 20	20
10	Befestigungsschraube(2)	Eisen	2,5x10	4
11	Befestigungsschraube(3)	Eisen	2,5x20	4
12	Unterlegscheiben Kamera	Gummi	innen Ø : 2,5 außen Ø : 6	5
13	Deckel	Flugzeugsperrholz	322x250x3	1
14	Verriegelung	Kunststoff/Stahl		1
15	Befestigungsplatte	Eisen		1
16	Hitzeschutz	Eisen/Kupfer	Mindestens 100x50x2	1
17	Führung Elektromagnet	Kieferleiste	10x10 nach Maß	
18	Aufleimer für Führung Elektromagnet	Flugzeugsperrholz	3mm nach Maß	
19	Experimentfuß	Flugzeugsperrholz	50x60x3	5
20	Halterung Elektromagnet	Kieferleiste	20x20x260	2
21	Elektromagnet			1
22	Briefwaage			1
23	Sanduhr			1

24	Kunststoffgefäß	PVC	59,5x59,5x87 200 ml	1
25	Buchenrundholz	Buche	Ø 4mm x 200mm	1
26	Styroporkugel	Styropor	Ø 50 mm	1
27	Nagel	Eisen	Ø 2 mm x 30mm	1
28	Kupferstab	Kupfer	Ø 3 mm x 120mm	1
29	Befestigungssockel	Kieferleiste	10x10x80mm	1
30	Unterlegscheiben	Eisen	Innen - Ø 3 mm Außen - Ø 5 mm	5
31	Auffangbox	Kunststoff	Innen 500x400x270mm	1
32a	Rahmen	Kieferleiste	55x55x500mm	2
32b	Rahmen	Kieferleiste	30x20x630	2
33	Aufhängung	Kieferleiste	30x20x630mm	1
34	Mini-Funk-Kamera			1

8.1.7 Bezugsquellen

Nummer	Bezeichnung	Quelle
1	Experimentierplattform	OBI/Baumarkt
2	Verstärkungsleisten	OBI/Baumarkt
3	Schraubverstärkung	OBI/Baumarkt
4a	Experimenthalterung(1)	OBI/Baumarkt
4b	Experimenthalterung(2)	OBI/Baumarkt
5	Kamerahalterung	OBI/Baumarkt
6	Fallbox	OBI/Baumarkt
7	Befestigungsschraube(1)	OBI/Baumarkt
8	Mutter für Befestigungsschraube(1)	OBI/Baumarkt
9	Unterlegscheibe	OBI/Baumarkt
10	Befestigungsschraube(2)	OBI/Baumarkt

11	Befestigungsschraube(3)	OBI/Baumarkt
12	Unterlegscheiben Kamera	Modellbaufachgeschäft/Conrad
13	Deckel	OBI/Baumarkt
14	Verriegelung	Modellbaufachgeschäft/Conrad
15	Befestigungsplatte	OBI/Baumarkt
16	Hitzeschutz	OBI/Baumarkt
17	Führung Elektromagnet	OBI/Baumarkt
18	Aufleimer für Führung Elektromagnet	OBI/Baumarkt
19	Experimentfuß	OBI/Baumarkt
20	Halterung Elektromagnet	OBI/Baumarkt
21	Elektromagnet	http://de.farnell.com/jsp/home/homepage.jsp
22	Briefwaage	http://ass-industriediscount.de
23	Sanduhr	Deutsches Museum Shop
24	Kunststoffgefäß	http://www.rotert.com/
25	Buchenrundholz	OBI/Baumarkt
26	Styroporkugel	OBI/Baumarkt
27	Nagel	OBI/Baumarkt
28	Kupferstab	OBI/Baumarkt
29	Befestigungssockel	OBI/Baumarkt
30	Unterlegscheiben	OBI/Baumarkt
31	Auffangbox	OBI/Baumarkt
32a	Rahmen	OBI/Baumarkt
32b	Rahmen	OBI/Baumarkt
33	Aufhängung	OBI/Baumarkt
34	Mini-Funk-Kamera	http://www.lupus-electronics.de/Lupus.html

bereitgestellt. Die Kondensatoren C1 und C2 dienen der Stabilisierung, Diode D1 als Schutz gegen Verpolung.

Das Signal von IC2 Trifft einerseits auf einen invertierenden, andererseits auf einen nicht invertierenden Eingang zweier Operationsverstärker (IC3). Die jeweils zugehörigen nicht invertierenden beziehungsweise invertierenden Eingänge der Operationsverstärker sind mit einem aus drei Widerständen bestehenden Spannungsteiler verbunden.

Im freien Fall, bei einer gemessenen Beschleunigung von etwa 0 g, beträgt die Signalstärke von IC1, wie erwähnt, etwa $\frac{1}{2}$ VCC. Diese Spannung liegt oberhalb der an Pin 2 und unterhalb der an Pin 5 von IC3 anliegenden Vergleichsspannung. Die beiden Ausgänge Pin 1 und Pin 7 der Operationsverstärker schalten daher auf „high“ (VCC).

IC4 besteht aus sechs invertierenden Schmidt-Triggern. Liegt nun an Pin 13 von IC4 „high“ an, wird dieses Signal vom Schmidt-Trigger invertiert, wird also zu „low“. Die beiden Ausgänge Pin 8 und Pin 10 liefern also als Signal, nach nochmaliger Invertierung ein „high“, also VCC an den roten Teil der Duo-LED D5, die im freien Fall also **rot** aufleuchtet.

Misst der Beschleunigungssensor einen positiven oder negativen Beschleunigungswert, so liegt sein Signal oberhalb beziehungsweise unterhalb von $\frac{1}{2}$ VCC. Daraus resultiert, dass einer der beiden Operationsverstärker (IC3) ein negatives, der andere ein positives Ausgangssignal liefert, die sich zu Null addieren. Daher liegt, wenn der Sensor eine Beschleunigung misst, insbesondere also, wenn er ruht (Beschleunigung 1g!) an Pin 13 von IC4 als Signal ein „low“ an und die LED leuchtet **grün**.

Mit Hilfe von R3 kann man einstellen, ab welchem Beschleunigungswert die LED im freien Fall auf rot umschaltet (Threshold). R2 wird verwendet, um den Bereich (Sensitivity), in dem die LED rot bleibt einzustellen.

Man bezeichnet diesen Schaltungstyp, also zwei Operationsverstärker, die dazu dienen ein elektronisches Bauteil genau dann zu schalten, wenn sich eine gemessene Spannung in einem vorgegebenen Bereich (Fenster) befindet, als Fensterkomparator³⁸.

Der Kondensator C3 stabilisiert das Signal von IC2, die Widerstände R7 und R8 dienen als Strombegrenzer für die LED D5.

Die beschriebene Schaltung wurde mit Standardkomponenten auf einer Lochrasterplatine realisiert. Etwas schwierig war es hierbei, den Beschleunigungssensor IC2 zu verlöten da es diesen nur als SMD-Bauteil gibt. Daher wird zur Zeit eine etwas vereinfachte Schaltung entwickelt, die nur noch mit einer einfarbigen LED funktioniert und komplett in SMD-Bauweise auf einer geätzten Platine aufgebaut wird.

³⁸ <http://ola.cti.ac.at/velo/KMP/KMP-2.htm> (26.06.2006)

Schaltplan, sowie eine Ätzvorlage für die Platine werden in kürze (Stand 26.06.2006) bei mir unter tobias-schuetzler@gmx.net erhältlich sein.

8.2.2 Verwendete Bauteile

Bauteil	Bezeichnung / Größe	Bezugsquelle
IC1	Spannungswandler 78L05	Conrad
S1	Mikroschalter	Conrad
D1	Diode 1N4004	Conrad
C1, C2	Kondensator 330 nF	Conrad
JP1, JP2	Jumper	Conrad
IC2	Beschleunigungssensor ADXL103	Digi-Key http://dkc1.digikey.com/de/digihome.html
C3	Kondensator 33 nF	Conrad
R1, R4	Widerstand 10 k	Conrad
R2	Potentiometer 1k	Conrad
R3	Potentiometer 10k	Conrad
IC3	Operationsverstärker TLC 272 CP	Conrad
D2, D3	Diode 1N4148	Conrad
IC4	Schmidt-Trigger 74HC14N	Conrad
R7, R8	Widerstand 1k	Conrad
D5	Duo-LED RG D2	Conrad