# Demonstrationsexperimente zur Levitation

# Diplomarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Magisters an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Karl-Franzens-Universität Graz

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher Institut für Experimentalphysik Technische Universität Graz

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen inländischen oder ausländischen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Die vorliegende Fassung entspricht der eingereichten elektronischen Version.

Graz, 5. Juli 2017

Unterschrift:

## für Martina

## Danke

An erster Stelle möchte ich mich bei meiner Freundin Martina bedanken, die mein Studium nicht nur ermöglicht, sondern auch durch tatkräftige Hilfe unterstützt hat.

Als zweites bedanke ich mich bei meinem Betreuer Professor DI Dr. Gernot Pottlacher, der mir die Gelegenheit gab hinter die Kulissen einer großen Experimentiervorlesung zu blicken wobei ich die Möglichkeit hatte, zahlreiche faszinierende Experimente selbst durchzuführen und der mich bei der Erstellung dieser Arbeit als Mentor herausragend betreut hat.

Der Dritte Dank gebührt meinen Freunden, meiner Familie und allen, die mich in der Zeit meines Studiums unterstützt und ertragen haben.

Am Schluss möchte ich dem großen Physiker und Astronomen Carl Sagan danken, dessen Dokumentationsreihe *Unser Kosmos* schon in meiner Kindheit die Faszination für die Physik geweckt und mich dadurch entscheidend zu meiner Berufswahl inspiriert hat.

# Inhaltsverzeichnis

1	Ехре	erimente zur Levitation	1
	1.1	Das Experiment als Frage an die Natur	1
	1.2	Das Demonstrationsexperiment	3
	1.3	Der Begriff der Levitation	5
2	Die 6	einzelnen Experimente	8
	2.1	Das Archimedische Prinzip	8
	2.1.1	Der Cartesische Taucher	10
	2.1.2	2 Ein Heißluftballon	12
	2.1.3	B Ein Heliumballon an einer Schnur	13
	2.1.4	1 Der Weiße Hai	14
	2.1.5	Ein Luftballon in CO <sub>2</sub>	16
	2.1.6	Der Wasserstoffballon	16
	2.1.7	7 Das Aluboot in SF <sub>6</sub>	17
	2.1.8	Cola light im Wasser	18
	2.1.9	Poröser Aluminiumschaum	19
	2.1.1	l0 Eisenholz	20
	2.1.1	L1 Das Galilei-Thermometer	21
	2.1.1	l2 "Density Paradox"	22
	2.1.1	L3 Blei versus Styropor in Luft und Vakuum	24
	2.2	Aerodynamik	26
	2.2.1	Ein Ball im Luftstrom	27
	2.2.2	Schwebende Schraubenzieher und Glühlampen	28
	2.2.3	Ball im Wasserstrahl	28
	2.2.4	1 Durchflussmesser	29
	2.2.5	Das Cola-Mentos-Experiment	30
	2.2.6	Magnus-Geschoß	31
	2.2.7	7 Eine Luftkissenbahn zeigt das Verhalten von Gasteilchen	32
	2.2.8	Ballon Helikopter	32
	2.3	Magnetismus	34
	2.3.1	Das Earnshaw-Theorem	36
	2.3.2	Permanentmagnete in der Schwebe	37
	2.3.3	B Die schwebende Magnetwalze	37
	2.3.4	1 Das Levitron	38
	2.3.5	5 Diamagnetisches Schweben	39

	2.4	Elektrostatik	41
	2.4.	1 Der Millikanversuch	42
	2.4.	2 Paul-Falle	45
	2.4.	3 Linearfalle	46
	2.4.	4 Elektrostatischer Schweber	47
	2.5	Elektromagnetismus	48
	2.5.	1 Das Ampère'sche Gesetz	48
	2.5.	2 Elektromagnete	49
	2.5.	3 Alufolie auf Induktionsplatte	50
	2.5.	Spule schwebt über Aluminium	50
	2.5.	5 Elihu Thomson-Versuch	51
	2.5.	Schwebende Erdkugel	51
	2.5.	7 Flyte	52
	2.6	Supraleitung	53
	2.6.	1 Der Meißner-Ochsenfeld-Effekt	55
	2.6.	2 Die magnetische Pille	56
	2.6.	B Das Möbiusband	56
	2.7	Gasentladung	58
	2.7.	1 Geschichtete Gasentladung	59
	2.7.	2 Elektronenstrahl	60
	2.7.	3 Hörnerblitzableiter	61
	2.8	Akustik	62
	2.8.	1 Akustische Levitation	63
	2.8.	Ein Ultraschallzerstäuber schleudert Wassertropfen in die Höhe	63
	2.9	Sonstiges und Zaubertricks	65
	2.9.	1 Hohlspiegel mit Frosch	65
	2.9.	2 Lil' Suchtioner	66
	2.9.	3 Tischtennisball in Reis	66
	2.9.	Schwimmende Münzen	68
	2.9.	5 Der Geysir	69
3	Lite	aturverzeichnis	71
4	Abb	ildungsverzeichnis	74
5	Anh	ang	76
	5.1	Auflistung der in der Weihnachtsvorlesung gezeigten Experimente	76

## 1 Experimente zur Levitation

#### 1.1 Das Experiment als Frage an die Natur

Zu keinem Zeitpunkt in der Geschichte der Menschheit war unser Wissen über die natürlichen Vorgänge und deren Ursachen so groß wie heute. Auch wenn uns die Natur noch immer zahlreiche Rätsel aufgibt und die Forschung manchmal mehr Fragen als Antworten liefert, blicken unsere Teleskope unzählige Lichtjahre in das Weltall und liefern Teilchenbeschleuniger Erkenntnisse über die kleinsten Bausteine der Welt. Auch aus dem täglichen Leben sind Gegenstände, die auf moderner physikalischen Forschung beruhen, nicht wegzudenken. Eine simple Digitaluhr wäre ohne die Erforschung der Quantenmechanik nicht möglich.

Trotzdem erfreuen sich Pseudowissenschaften, also Lehren, die behaupten eine Wissenschaft zu sein ohne die wissenschaftlichen Ansprüche zu erfüllen, einer stetigen und ungebrochenen Beliebtheit. Auch wenn es um UFOs, Nessie und den Yeti in letzter Zeit etwas ruhiger geworden ist, füllt esoterische Literatur die Regale von Buchhandlungen, sind Leichtgläubige bereit sich für gutes Geld die Zukunft mittels Handlesen, Kartenlegen und Horoskopen vorhersagen zu lassen. Manche ihrer Vertreter bedienen sich ganz unverschämt der wissenschaftlichen Sprache, eben um Wissenschaftlichkeit vorzutäuschen, Gutachten von zweifelhaften Institutionen sollen diese dann bestätigen.

Auf diesen Mangel an Wissenschaftlichkeit angesprochen, replizieren Anhänger jener Pseudowissenschaften oft in poststrukturalistischer Beliebigkeit. So gäbe es eben unterschiedliche Interpretationen des Begriffs der Wissenschaft und des wissenschaftlichen Arbeitens, die Disziplinen könnten gut nebeneinander existieren und am Ende hat jeder auf seine Art recht und ist jede Form von Wissenschaft gleichberechtigt.

Diese Annahme ist allerdings falsch. Es gibt eine sehr scharfe Trennlinie zwischen der Wissenschaft und den Pseudowissenschaften: Das Experiment und die Ansprüche, die daran gestellt werden. Ein wissenschaftliches Experiment wird grundsätzlich nur dann anerkannt, wenn es reproduzierbare Ergebnisse liefert und dabei unabhängig von Ort, Zeit und den Personen, die es schließlich durchführen, ist. Eine physikalische Theorie, so elegant sie auch sein mag, muss der experimentellen Überprüfung standhalten, ansonsten gilt sie als widerlegt. Gemäß des in der Wissenschaft allgemein anerkannten kritischen Rationalismus des Philosophen Karl Popper kann eine physikalische Theorie nur falsifiziert aber niemals verifiziert werden. (Meschede, 2010, S. 2)

In der naturwissenschaftlichen Forschung ist das Experiment ein Verfahren zur Erkenntnisgewinnung. Es dient dem Sammeln von Daten, wobei die Rahmenbedingungen festgelegt sind und kontrolliert

werden, Messungen und Beobachtungen werden durchgeführt. Diese Art der Durchführung bedarf einer umfassenden Planung, die relevanten Variablen müssen genau kontrolliert sowie die Daten präzise aufgenommen werden. Erst wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, kann die physikalische Interpretation vor einem theoretischen Hintergrund erfolgen. (Kircher, Girwidz, & Häußler, 2007, S. 230)

#### 1.2 Das Demonstrationsexperiment

Anders als in der Forschung, in der Experimente dazu dienen, wissenschaftliche Theorien auf ihre Gültigkeit unter bestimmten Umständen zu überprüfen, dienen Experimente im Bereich der Didaktik dazu, physikalische Phänomene anschaulich darzustellen und den Lernenden einen Aufbau von physikalischen Vorstellungen zu ermöglichen. Auch liegt im Schulunterricht die Aufgabe von Experimenten ebenso darin, durch gezeigte Phänomene physikalische Fragestellungen in den Betrachtungshorizont der Schülerinnen und Schüler zu rücken, indem die Antwort von der Natur selbst gegeben wird. Das Experiment bildet hier das Bindeglied zwischen wissenschaftlicher Theorie und der wahrnehmbaren Realität. Im Gegensatz zum Experiment in der Wissenschaft tritt die umfassende Planung, präzise Datenaufnahme, Analyse der Daten und die Interpretation in Bezug auf den theoretischen Hintergrund beim Schul- und Schauexperiment zurück, auch findet bei Demonstrationsexperimenten eine quantitative Auswertung der Messergebnisse üblicherweise nicht statt. (Kircher, Girwidz, & Häußler, 2007, S. 230 ff)

Experimente können im Schulunterricht grundsätzlich auf zwei Arten durchgeführt werden, als Schüler- oder Demonstrationsexperiment. Schülerexperimente bieten den Vorteil, dass die Schülerinnen und Schüler Gelegenheit haben, eigene Erfahrungen bei physikalischen Tätigkeiten zu sammeln, erfüllen den Drang nach Eigentätigkeit und helfen beim Erwerb experimenteller Handlungskompetenz und von fachspezifischen Arbeitsweisen. Auch können physikalische Gesetze und Zusammenhänge in der selbständigen Anwendung erfahren und verstanden werden. Da die Experimente üblicherweise in kleinen Gruppen durchgeführt werden, spielt das soziale Verhalten in diesen eine nicht unerhebliche Rolle und nicht zuletzt sind Schülerexperimente ein ausgezeichnetes Medium um Freude an physikalischer Tätigkeit, das präzise zielstrebige Arbeiten und eine gewisse Ausdauer zu vermitteln. (Kircher, Girwidz, & Häußler, 2007, S. 244)

Neben den Vorteilen, die Schülerexperimente bieten, besteht auch die Gefahr, dass sie von Alltagsvorstellungen der Schülerinnen und Schülern geleitet werden, die nicht mit den zugrundeliegenden physikalischen Vorstellungen übereinstimmen und andere Beobachtungen und Interpretationen als von der Lehrperson gewollt anstellen. In manchen Situationen können Demonstrationsexperimente effektiver als Schülerexperimente sein, da die Möglichkeit der Ablenkung von den eigentlichen Lernzielen durch Funktionsweisen der verwendeten Geräte oder übertriebenem Hang zum Formalismus bei der Protokollierung besteht. Auch diese Tätigkeiten sind wichtig und sollen im Sinn eines zeitgemäßen Physikunterrichts unbedingt geübt werden, welcher Aspekt nun in den Vordergrund rückt, sollte bei der konkreten Unterrichtsplanung auf jeden Fall zu Beginn festgelegt werden. (Tesch & Duit, 2002)

Das Vorführen von Demonstrationsexperimenten ist nicht alleine auf den Unterricht an Schulen und Universitäten und ebenso nicht nur auf die Vermittlung von physikalischem Wissen beschränkt. Nicht zuletzt spielt in der jährlich stattfindenden Weihnachtsvorlesung auf der Technischen Universität der Unterhaltungscharakter eine bedeutende Rolle. Dass sich die Mischung aus Humor und Wissenschaft eines breiten Interesses erfreut, beweist nicht nur die Beliebtheit der Science Busters, deren Wissenschaftskabarett seit Jahren für ausverkaufte Vorstellungen sorgen. Natürlich bieten spektakuläre Demonstrationsversuche vor großem Publikum eine hervorragende Möglichkeit, Menschen für die Wissenschaft zu begeistern.

#### 1.3 Der Begriff der Levitation

Die Herkunft des Begriffes Levitation lässt sich auf lateinische Wort *levitas* zurückführen was mit Leichtigkeit oder Beweglichkeit übersetzt werden kann, des Weiteren gibt es in der italienischen Sprache das Wort *levare*, das sich mit heben, emporhaben oder aufheben übersetzen lässt. Heute wird mit dem Begriff der Levitation ein Vorgang bezeichnet, bei dem ein Objekt ohne physischen Kontakt in einer stabilen Position gehalten wird (Su & Wallaschek, 2011, S. 123). Dies kann man durch verschiedene physikalische Effekte erreichen, manche der Experimente bedienen sich eines Mediums wie das Aluminiumboot, das in einem mit Schwefelhexafluorid gefüllten Aquarium schwebt, andere, als Beispiel sei hier das Levitron genannt, funktionieren ausschließlich aufgrund jener Felder, die von den physikalischen Wechselwirkungen erzeugt werden. Im letzteren Fall macht es uns die Natur nicht leicht, so erklärt das Earnshaw-Theorem, das ebenfalls in dieser Arbeit behandelt wird, warum es nicht möglich ist, einen Permanentmagneten ohne zusätzliche Stabilisierungen über einem anderen dauerhaft schweben zu lassen. Natürlich haben sich zahlreiche Forscher und Erfinder dieses Problems angenommen und eine Reihe von Methoden entwickelt um diese Schwierigkeiten zu umgehen, manche davon konnten wir im Rahmen unserer Vorlesung demonstrieren und in dieser Arbeit beschreiben.

Das freie, stabile Schweben eines Objekts scheint ein Zustand zu sein, der von der Natur abgelehnt wird. Anders als das aerodynamische Fliegen, das wir von Insekten, Vögeln oder Pflanzansamen kennen, erwecken schwebende Gegenstände eher den Eindruck des geheimnisvollen und mystischen als den eines natürlichen Vorgangs. Dass die Idee des Levitierens die Phantasie des Menschen beflügelt, zeigt nicht zuletzt die Präsenz des Phänomens in zahlreichen Hollywoodfilmen, als Beispiel seien hier nur die Hoverboards aus *Zurück in die Zukunft*, Jet Bikes aus *Star Wars* oder die schwebenden Felsen aus *Avatar* genannt. Personen, die auf der Kinoleinwand über ihrem Bett schweben, werden entweder gerade von Außerirdischen entführt oder sind von diversen Dämonen oder sogar dem Teufel selbst besessen. Jedenfalls erscheint uns der Anblick zutiefst unheimlich und unnatürlich. Schon bevor die Bilder laufen lernten, brachten Heerscharen von Zauberkünstlern und Taschenspielern vor begeistertem Publikum Personen mit ausgeklügelten Tricks und Apparaturen scheinbar zum Schweben, noch heute erfreut sich diese Tricks bei Magievorführungen hoher Beliebtheit. Auch das scheinbare Levitieren großer Gegenstände schafft es als Zaubertrick in die Vorstellungen prominenter Magiekünstler.

Neben diesen offenkundigen Illusionen, die der Unterhaltung eines Publikums dient, das sich zwar für das Staunen begeistern kann, sich allerdings der Täuschung bewusst ist, gibt es in zahlreichen Kulturen

Berichte über levitierende Menschen, selbst Jesus soll über das Wasser gewandelt sein (Matthäus 14, 25 f). Auch in unserer modernen und aufgeklärten Welt verbreiten Medien, sei es das Fernsehen oder das Internet, angebliche Berichte über Personen mit der Fähigkeit ohne Hilfsmittel zu schweben. Bis heute entbehren sie jeglicher wissenschaftlichen Grundlage, im besten Fall dienen solche Schilderungen aus dem Bereich der Parapsychologie oder einer anderen Pseudowissenschaft dem Bedürfnis nach Aufmerksamkeit, im schlechtesten stehen klar betrügerische Absichten dahinter.

Die Levitation, also das stabile Schweben eines Gegenstandes ohne feste Verbindung, ist zweifelsfrei ein faszinierender Effekt. Der Kreisel des Levitrons, der minutenlang über dem Magnetring schwebt, besitzt für mich noch immer einen Hauch von Magie. Allerdings sind Vorgänge, bei denen Gegenstände levitieren nicht nur erstaunliche Phänomene, die im Rahmen spektakulärer Demonstrationsversuche gezeigt werden können. Für das Festhalten von Gegenständen ohne physischen Kontakt existieren vor allem in der Wissenschaft zahlreiche Anwendungen.

So wird in Chemie und Pharmazie an förderbandartigen Konstruktionen, die mithilfe von Ultraschall Flüssigkeiten und kleine Gegenstände berührungslos transportieren können, geforscht. Mithilfe elektrostatischer und elektromagnetischer Levitation werden in den USA, Japan, Korea aber auch Deutschland und Österreich verschiedenste materialwissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt, wie auch manche in der Vorlesung gezeigten Videoaufnahmen zeigen. Sogar an Bord der in einem Orbit um die Erde befindlichen Raumstation ISS werden durch verschiedene Methoden Gegenstände zum Zweck von Untersuchungen oder Experimenten ohne direkten physischen Kontakt festgehalten.

Bei der in dieser Arbeit vorgestellten Experimentiervorlesung zum Thema Levitation handelt es sich um die Weihnachtsvorlesung von Professor DI Dr. Pottlacher. Bei dieser handelt es sich um eine jährliche Demonstrationsvorlesung, die sich mittlerweile zu einer festen Institution auf der Technischen Universität Graz entwickelt hat. Sie findet jedes Jahr kurz vor Weihnachten statt und behandelt dabei jedes Mal ein anderes physikalisches Thema. Da sich diese Vorlesung nicht nur an Studierende der Physik, sondern an alle Interessierten richtet, sind wir, um die Besucher mit spektakulären Experimenten unterhalten zu können, mit dem Begriff der Levitation eher großzügig umgegangen. Dadurch fanden auch Versuche, die sich nur mit etwas gutem Willen darunter subsummieren lassen, Eingang in die Weihnachtsvorlesung und diese Arbeit.

Eine der Herausforderungen dieser Arbeit lag darin, dass der Begriff der Levitation nicht auf einen bestimmten Bereich der Physik eingegrenztes Phänomen beschränkt ist, sondern einen Effekt beschreibt, der durch zahlreiche unterschiedliche physikalische Gesetzmäßigkeiten hervorgerufen werden kann. Ich habe versucht bei den einführenden Teilen der einzelnen Unterkapitel jeweils die Grundlagen elementar zu erklären, den Rahmen aber nicht zu sprengen, ich hoffe, dieser Kompromiss ist gelungen.

## 2 Die einzelnen Experimente

#### 2.1 Das Archimedische Prinzip

Eine Erfahrung unseres täglichen Lebens ist, dass Gegenstände, die in Flüssigkeiten getaucht werden, in dieser Flüssigkeit weniger zu wiegen scheinen als außerhalb. So können wir etwa schwere Steine leichter vom Grund eines Gewässers aufheben als in der Luft. An der Oberfläche angelangt, erscheint er plötzlich wesentlich schwerer. Manche Stoffe, beispielsweise die meisten Holzarten, schwimmen sogar an der Oberfläche. Dahinter steckt die physikalische Kraft des Auftriebes. Die Schwerkraft, eine Folge der Gravitation, wirkt in unseren Beispielen jeweils nach unten. Die Flüssigkeit übt allerdings eine zusätzliche Auftriebskraft, die nach oben und somit der Schwerkraft entgegengerichtet ist, aus. Das geschieht an der Luft ebenso, allerdings ist ihre Dichte wesentlich geringer als die von beispielsweise Wasser, daher ist der Effekt hier schwächer ausgeprägt. Wodurch entsteht nun dieser Auftrieb? Wie wir ebenfalls aus dem Alltag wissen, erhöht sich der Druck einer Flüssigkeit mit zunehmender Tiefe. Dadurch ist der Druck an der Unterseite eines getauchten Gegenstandes, der nach oben wirkt, höher als der an der Oberseite, der nach unten gerichtet ist.

Abbildung 1 zeigt einen Würfel, der sich unter Wasser befindet. h<sub>1</sub> und h<sub>2</sub> sind die Abstände der Oberbzw. Unterseite des Würfels zur Oberfläche. h ist die Differenz dieser Abstände und damit gleichzeitig die Höhe des Würfels, A die Fläche der Ober- und Unterseite. F<sub>1</sub> stellt die Kraft dar, den die Flüssigkeit von oben auf den Würfel ausübt und die ihn nach unten drückt, während F<sub>2</sub> die Kraft ist, welche die Flüssigkeit von unten ausübt, um ihn nach oben zu drücken.

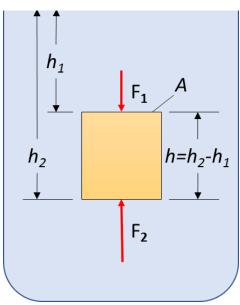


Abbildung 1: Auftriebskraft; eigene Darstellung.

Druck ist definiert als Kraft pro Fläche, in diesem Fall gilt

$$p = \frac{F}{A}. (1.1)$$

Somit gilt ebenfalls

$$F = pA. (1.2)$$

Ebenso gilt für den hydrostatischen Druck

$$p = \rho_F g h \tag{1.3}$$

wobei  $\rho_F$  die Dichte der Flüssigkeit, g die Erdbeschleunigung auf der Erdoberfläche von ungefähr  $9,81~ms^{-2}$  und h die Höhe der Flüssigkeit über dem Messpunkt ist.

Werden diese Ausdrücke gleichgesetzt, erhält man für die Kraft, die von oben auf den Würfel drückt,

$$F_1 = p_1 A = \rho_F g h_1 \tag{1.4}$$

sowie für die Kraft, die ihn von der Unterseite in Richtung der Oberfläche drückt:

$$F_2 = p_2 A = \rho_F g h_2 \tag{1.5}$$

Wir erhalten die Auftriebskraft F<sub>A</sub>, indem wir die Differenz dieser beiden Kräfte ermitteln:

$$F_A = F_2 - F_1 = \rho_F g A(h_2 - h_1) = \rho_F g A h \tag{1.6}$$

Da das Volumen V unseres Würfels das Produkt aus der Grundfläche und der Höhe ist, gilt ebenso

$$F_A = \rho_F g A h = \rho_F V g = mg. \tag{1.7}$$

Die Auftriebskraft ist demnach die Gewichtskraft des verdrängten Fluides. Im eben genannten Beispiel wurde Wasser mit einer Dichte von ungefähr 1000 kgm<sup>-3</sup> verwendet. Sie ist grundsätzlich für jeden Körper vorhanden, der sich in einem Fluid, also einer Flüssigkeit oder einem Gas, welches unter hydrostatischem Druck steht, befindet. Auch an der Luft erfährt jeder Körper eine Auftriebskraft. Sie wird nur deshalb meist nicht bemerkt, da die Dichte von Luft bei üblichem Luftdruck an der Erdoberfläche und einer Temperatur von 20 °C eine Dichte von etwa 1,2 kgm<sup>-3</sup> hat, während die der Gegenstände unseres täglichen Gebrauchs wesentlich höher ist. In manchen Fällen kann man sich diese statische Auftriebskraft dennoch zunutze machen, zum Beispiel bei Heißluftballons oder Luftschiffen.

Da diese Gegenstände ebenso der Schwerkraft unterworfen sind, gelangen wir zur Erkenntnis, dass die resultierende Kraft, die auf den Körper wirkt, die Differenz aus der Gewichtskraft und dem Auftrieb ist. In dem Fall, in dem er eine höhere Dichte als das Fluid hat, ist die Schwerkraft stärker als der Auftrieb und der Gegenstand bewegt sich nach unten, im umgekehrten Fall steigt er auf. Dies geschieht unabhängig von der Form, ausschlaggebend ist nur die Dichte. Ist die des Gegenstandes gleich der des umgebenden Fluides, haben sich diese beiden Kräfte auf und die resultierende Kraft ist Null. In diesem Fall schwebt der Körper, dies wird "Levitation" genannt.

Der Legende nach entdeckte der griechische Mathematiker Archimedes im 3. Jh. V. Chr. beim Baden dieses Prinzip, als er von Hieron II, dem Tyrannen von Syrakus, die Aufgabe gestellt bekam, herauszufinden, ob eine Krone aus echtem Gold oder eine Fälschung sei. Der Zusammenhang zwischen Volumen, Dichte und Masse war zwar schon bekannt, allerdings ließ sich das Volumen der unregelmäßig geformten Krone nicht ausreichend bestimmen. Wiegt man einen Gegenstand allerdings unter Wasser und in der Luft, lässt sich die Dichte ermitteln. Diese Erkenntnis soll Archimedes so aufgewühlt haben, dass er "Heureka!" (Ich habe es gefunden!) ausrufend durch die Straßen von

Syrakus lief. Ob sich diese Geschichte tatsächlich so zugetragen hat, ist durchaus zweifelhaft, allerdings verdanken wir ihr die Tatsache, dass dieser Effekt heute noch als das "Archimedische Prinzip" bekannt ist. (Giancoli, 2010, S. 460 ff)

#### 2.1.1 Der Cartesische Taucher

Ein beliebtes Spielzeug, welches sich das Archimedische Prinzip zunutze macht, ist der sogenannte "Cartesische Taucher". Sein Name stammt daher, dass die Erfindung irrtümlich dem französischen Philosophen René Descartes (1596-1650) zugeschrieben wurde. Heute wird allerdings davon ausgegangen, dass der italienische Physiker Raffaello Magiotti das Prinzip als erstes publiziert hatte. Der Umstand, dass die Taucher oftmals die Gestalt eines Teufels besitzen wird dadurch erklärt, dass die Zeit, in der René Descartes wirkte, davon geprägt war, die kritische Vernunft des Menschen über die Vorstellungen des Glaubens zu erheben. Der Flaschenteufel diente also auch der Provokation kirchlicher Autoritäten. (Burger, 1988, S. 139 ff)

Als Cartesischer Taucher wird ein hohler Körper bezeichnet, der über eine Öffnung nach außen verfügt. In diesem Hohlraum befinden sich Luft und Wasser in genau dem Verhältnis, dass der Körper gerade nicht untergeht, wenn man ihn in einen mit Wasser gefüllten Behälter setzt. Die Dichte des gesamten Tauchers liegt also ein wenig unter der Dichte von Wasser, aus diesem Grund ist der Auftrieb stärker als die Schwerkraft, er schwimmt an der Oberfläche.

Befindet sich der Taucher in einem leicht verformbaren und verschlossenen Behältnis, wie beispielsweise einer zugeschraubten PET-Flasche oder einem mit einem Gummipfropfen abgedichteten Glaszylinder, kann man durch Drücken von außen den Druck innerhalb der Flasche und ebenso unseres Cartesianischen Tauchers erhöhen. Wir haben es nun mit zwei Stoffen zu tun, die über unterschiedliche Eigenschaften verfügen: Wasser gilt in sehr guter Näherung als inkompressibel und behält auch unter hohem Druck sein Volumen und damit seine Dichte bei. Luft hingegen lässt sich als Gas gut komprimieren, unter Druck wird das Volumen entsprechend dem allgemeinen Gasgesetz geringer.

Obwohl ihm zahlreiche Vereinfachungen zugrunde liegen, beschreibt das ideale Gasgesetz das makroskopische Verhalten von Gasen in einer guten Näherung. Zu diesen Abstraktionen zählen unter anderem die Annahmen, dass zwischen den Teilchen, abgesehen von kurzen Stoßvorgängen, keine beispielsweise elektromagnetischen Wechselwirkungen stattfinden, die Moleküle ohne Eigenvolumen, also punktförmig sind und Phasenübergänge nicht berücksichtigt werden. Das ideale Gasgesetz ist als Zustandsgleichung formuliert, eine solche drückt die wechselseitige Abhängigkeit messbarer Eigenschaften in einem System voneinander aus:

$$pV = Nk_BT (1.8)$$

Dabei ist p der Druck, V das Volumen, N die Anzahl der Moleküle,  $k_B$  die Boltzmannkonstante mit einem Wert von näherungsweise  $1,38\cdot 10^{-23}\,\text{JK}^{-1}$  und T die Temperatur in Kelvin. Da die Teilchenzahl N im vorliegenden Fall nicht verändert wird und  $k_B$  eine Naturkonstante ist, kann vereinfacht gesagt werden, dass das Produkt aus dem Druck und dem Volumen direkt proportional zur Temperatur ist:

$$pV \sim T$$
 (1.9)

Nimmt man zusätzlich an, dass sich die Temperatur in diesem Vorgang nicht wesentlich ändert, dies wird als isotherme Zustandsänderung bezeichnet, bedeutet dies, dass das Volumen indirekt proportional zur Temperatur ist:

$$V \sim p^{-1} \tag{1.10}$$

Diese Beziehung ist nach Robert Boyle (1627-1691) als Boyle-Mariott'sches Gesetz benannt. Verdoppelt man den Druck auf ein Gas, wird es, wenn dabei die Temperatur konstant bleibt, auf die Hälfte seines Volumens komprimiert. (Giancoli, 2010, S. 609 ff)



Abbildung 2: Cartesischer Taucher in einem verschlossenen Glaszylinder. Gut erkennbar ist die gewundene Austrittsöffnung um die Taille des Teufelchens; eigenes Bild.

Wenn nun von außen Druck auf das Behältnis, in dem sich der auf Abbildung 2 zu sehende Cartesische Taucher befindet, ausgeübt wird, wird die Luft im Taucher komprimiert und durch die Öffnung dringt Wasser ein. Dadurch erhöht sich die Dichte des gesamten Tauchers, sobald sie die von Wasser überschreitet, sinkt er nach unten. Lässt man die Flasche oder den Gummipfropfen wieder aus, sinkt der Druck im Inneren, die im Taucher befindliche Luft dehnt sich wieder aus, wobei sie das Wasser durch die Öffnung nach außen drückt. Sobald er die Dichte des Wassers unterschreitet, überwiegt der Auftrieb gegenüber der Schwerkraft und der Taucher steigt wieder auf. Entspricht die Dichte des Tauchers genau der des umgebenden Wassers, befindet er sich im labilen Gleichgewicht und schwebt bzw. levitiert.

Der "Tanz der Teufel", also die Drehung der kleinen Figuren, folgt aus der Impulserhaltung. Wenn der Druck auf das Behältnis mit dem Cartesischen Taucher verringert wird, vergrößert sich das Volumen der Luft in seinem Inneren und

das Wasser strömt durch die Öffnung aus dem Taucher. Ist diese Öffnung um den Taucher gewunden und erfolgt das Ausströmen tangential zur vertikalen Achse des Tauchers, wird durch die Erhaltung des Gesamtimpulses ein Drehmoment auf ihn ausgeübt und die kleine Figur beginnt zu rotieren.

#### 2.1.2 Ein Heißluftballon



Abbildung 3:Unter dem kritischen Blick des Experimentators entschwebt der Ballon in Richtung der Decke; eigenes Bild.

Eine durchaus beeindruckende Anwendung des Archimedischen Prinzips unter Ausnutzung des idealen Gasgesetzes sind Heißluftballons. Um den Aufstieg eines Ballons mit seiner gesamten Masse zu ermöglichen, muss das darin enthaltene Gas eine geringere Dichte aufweisen als die umgebende Luft. In unserem Experiment auf Abbildung 3 wurde ein sogenannter Kong-Ming-Lampion verwendet, der einem Sack aus Papier gleicht und mithilfe eines Feuers aufsteigt. Diese Ballons sind aufgrund eben dieses Feuers in der Nacht gut zu sehen und sollen schon vor 2000 Jahren, also mehr als 1700 Jahren vor den Flügen der Brüder Montgolfier, vom chinesischen Militärkommandanten Kong-Ming zur Kommunikation eingesetzt worden sein. Damit gelten sie als die ältesten Heißluftballons der Welt. Auch wenn sich Kong-Ming-Laternen in den letzten Jahren insbesondere zu Silvester einer großen Beliebtheit erfreuten, sind sie aufgrund der Gefahr von Bränden und Irritationen des Flugverkehrs in Österreich verboten. (MA 36, 2016) Bei der Vorführung im Rahmen unserer

Weihnachtsvorlesung wurde aus Sicherheitsgründen das Brennmaterial entfernt und die Luft im Inneren des Lampions mit einem Gasbrenner erhitzt.



Abbildung 4: Heißluftballons; Bild: Julia Scheiber.

Eine Möglichkeit, die geringere Dichte innerhalb des Ballons und ein Überwiegen des Auftriebes gegenüber der Gewichtskraft zu erreichen, ist bei den Heißluftballons auf Abbildung 4 das Erhitzen der im Inneren befindlichen Luft. Eine Gemeinsamkeit mit dem Cartesischen Taucher in Kapitel 2.1.1 ist die Öffnung, durch die ständig ein Druckausgleich mit der Umgebung hergestellt wird. Im Gegensatz zu den tanzenden Teufelchen kann durch diese die Luft nach Belieben ein- und

ausströmen, die Anzahl der Luftteilchen im Inneren ändert sich dadurch, während sie beim Taucher grundsätzlich konstant bleibt. Auch dieser Fall kann mit dem idealen Gasgesetz erklärt werden, anders als beim Taucher ändern sich in diesem Fall Temperatur und Teilchenzahl, während Volumen und Druck unverändert bleiben. Strömt nun aufgrund der Erwärmung Luft aus der Öffnung aus dem Ballon, befinden sich in seinem Inneren verhältnismäßig weniger Luftteilchen in einer Volumeinheit als außerhalb, daher ist die Dichte der Luft im Ballon geringer. Damit er tatsächlich aufsteigen kann, muss der Auftrieb größer sein als die Gewichtskraft des Ballons der eventuell noch eine Gondel, den Brenner mit Gasinhalt und Passagiere trägt. (Demtröder, Experimentalphysik 1 Mechanik und Wärme 6. Auflage, 2012, S. 187 ff)

#### 2.1.3 Ein Heliumballon an einer Schnur

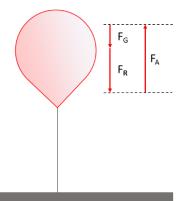


Abbildung 5: Kräftegleichgewicht bei festgebundenem Ballon; eigene Darstellung.

Abbildung 5 zeigt die Wirkungsweise gasgefüllter Ballons. Im Gegensatz zu den nach unten offenen Heißluftballons, die ihren Auftrieb aufgrund der geringeren Dichte erwärmter Luft erhalten, sind diese Ballons mit Gasen gefüllt, die bei gleicher Temperatur eine geringere Dichte als Luft haben. Da der Inhalt möglichst am Entweichen gehindert werden soll, werden hohe Anforderungen an die Dichtheit der Hülle gestellt. Für die Erklärung dieses Versuches dient wiederum die vereinfachte Modellvorstellung des idealen Gasgesetzes. Neben den bisherigen Ausführungen besagt es, dass ein Mol eines Gases bei gleichem Druck und gleicher Temperatur immer

das gleiche Volumen einnimmt. Bei den sogenannten STP-Bedingungen, also Standarttemperatur von  $0^{\circ}$ C und dem Druck von 1 bar =  $10^{5}$  bar wird von einem Mol eines beliebigen Gases immer dasselbe Molvolumen eingenommen:

$$V_{mol} = 22.4 l$$
 (1.11)

Im SI-System ist das Mol die Basiseinheit der Stoffmenge einer beliebigen Substanz. Es enthält die Avogadro-Zahl an Teilchen:

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \tag{1.12}$$

(Meschede, 2010, S. 104 f)

Ist die Außenhaut dehnbar wie beispielsweise bei einem Luftballon, ist der Druck im Inneren geringfügig höher als außerhalb. Wer jemals einen Luftballon aufgeblasen hat weiß, dass man vor allem am Anfang ordentlich hineinpusten muss. Dies liegt daran, dass zur Dehnung der Hülle Arbeit

erforderlich ist, da das gedehnte Material bestrebt ist, in den Ausgangszustand zurückzukehren und dadurch eine Kraft auf das im Inneren befindliche Gas ausübt. Legt man also einen aufgeblasenen Luftballon auf eine Waage, zeigt diese ein höheres Gewicht an als bei einem Leeren, da die Luft in seinem Inneren eine höhere Dichte hat als die außerhalb. Dieser Druck- und damit Dichteunterschied bei gleicher Temperatur muss ebenfalls berücksichtigt und überwunden werden, wenn der Auftrieb stärker als die Gewichtskraft sein soll, ebenso wie die Masse der Ballonhülle selbst.

Als kleines Detail sei hier erwähnt, dass niemand geringerer als Michael Faraday (1791 – 1867) den Luftballon im Jahr 1824 erfunden hat. Der englische Physiker und Chemiker war dabei den Wasserstoff zu erforschen und schnitt zu diesem Zweck zwei dünne Kautschuklagen aus und bestäubte sie in der Mitte mit Mehl. Die Ränder, die von der Mehlschicht nicht bedeckt waren, konnten gut verbunden werden. Dadurch konnte Faraday sie mit Wasserstoff füllen, aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff, stiegen die Ballons nach oben. Schon ein Jahr später hielt seine Erfindung Einzug in die Kinderzimmer. (Spektrum.de)

#### 2.1.4 Der Weiße Hai



Abbildung 6: Wir werden ein größeres Boot brauchen - Der Weiße Hai beim Testflug im Physikgebäude der TU-Graz; eigenes Bild.

Eine besonders unterhaltsame Variante des Gasballons ist unser Weißer Hai auf Abbildung 6. Auch hier macht man sich die geringere Dichte des Gases im Inneren zunutze, um die Hülle und zusätzlich montierte Teile in der Schwebe zu halten. Die Vorwärtsbewegung erfolgt durch ein hin-und-her Schlagen der Schwanzflosse mittels eines kleinen Servomotors. Die Längsneigung lässt sich mittels einer kleinen Gondel, die sich entlang einer Zahnstange der vorderen Unterseite bewegt, steuern. Eine Änderung der Höhe ist also nur dynamisch möglich, indem man zuerst die Nase nach oben oder unten neigt und nach vorne fliegt. Die Steuerung funktioniert mit einer Infrarot-Fernbedienung aus verschiedenen Winkeln und über größere Distanzen erstaunlich gut, den Hai richtig auszutarieren, damit er genau in der Schwebe bleibt, erfordert allerdings etwas

Fingerspitzengefühl. Er reagiert auch recht empfindlich auf Aufwinde, wodurch es herausfordernd werden kann, den Hai in einem voll besetzten Hörsaal wieder zu Boden zu bringen. Der Blick der Laborpraktikanten, als sich unser lautloser Jäger beim Testflug anschlich, bleibt unbezahlbar.

#### 2.1.4.1 Wasserstoff oder Helium?

Wie bereits erläutert, nimmt ein Mol eines idealen Gases bei gleichem Druck und gleicher Temperatur immer das gleiche Volumen ein. Durch die Erwärmung von Luft im Inneren eines Ballons, kann man also erreichen, dass sie eine geringere Dichte als die Luft außerhalb hat und der Ballon dadurch schweben oder aufsteigen kann. Das funktioniert auch, wenn man ein Gas verwendet, dessen Dichte von vorneherein geringer als die von Luft ist. Da man beim idealen Gas annimmt, dass auch die Abstände zwischen den Atomen oder Molekülen unabhängig von der chemischen Zusammensetzung sind, kann grob davon ausgegangen werden, dass die Dichte linear mit der Atommasse skaliert. Da der Massenunterschied zwischen Protonen und Neutronen so wie die Masse der Elektronen sehr gering sind und die Auswirkungen des Massendefekts hier ebenso vernachlässigbar sind, werden zur folgenden Rechnung nur die Nukleonenzahlen verglichen.

Unsere Luft besteht zu ungefähr 78 % aus Stickstoff, 21 % aus Wasserstoff und zu etwa 1 % aus Argon. Es kommen auch andere Gase vor, allerdings nicht in Mengen, die für dieses Beispiel Bedeutung haben. Ein Stickstoffatom hat üblicherweise 14 Nukleonen, der Stickstoff kommt in unserer Atmosphäre ausschließlich als N<sub>2</sub>-Molekül vor, in diesem Fall sind es 28. Sauerstoff, der ebenso nur in gebundener Form vorkommt hat 16 Nukleonen, im Fall des O<sub>2</sub>-Moleküls sind es 32. Argon ist ein Edelgas das grundsätzlich keine Bindungen eingeht, es verfügt über 40 Nukleonen. Rechnet man diese Zahlen in die oben genannten Prozentsätze, erhält man einen Wert von etwa 29 Nukleonen, die ein durchschnittliches Atom oder Molekül unserer Atemluft hat. Der Kern eines typischen Wasserstoffatoms besteht aus nur einem Proton, Wasserstoffgas kommt grundsätzlich als H<sub>2</sub>-Molekül vor, dieses ist mit einer Nukleonenzahl von 2 ungefähr um das 14-fache leichter als Luft bei gleichen Druck- und Temperaturverhältnissen. Helium, so wie Argon ein Edelgas, das keine Bindungen eingeht, hat mit seiner Nukleonenzahl von 4 eine Dichte, die ungefähr einem Siebentel jener der Luft entspricht.

Sowohl Wasserstoff als auch Helium eignen sich aufgrund der genannten Eigenschaften gut, um eine mit einem dieser Gase befüllten Hülle schweben oder aufsteigen zu lassen und auch Gegenstände oder Personen in die Lüfte zu heben. Die Befüllung mit Wasserstoff hat den Vorteil, dass seine Dichte nur die Hälfte jener von Helium entspricht und damit mehr Auftrieb erzeugt werden kann. Auch ist die Gewinnung von H<sub>2</sub> recht kostengünstig und die Ressource ist praktisch unbegrenzt vorhanden. Allerdings ist Wasserstoff ein hoch reaktives und brennbares Gas, das vermischt mit Sauerstoff ein hochexplosives Knallgasgemisch bildet. In unserem Fall wurde der Hai mit Helium befüllt, das zwar wesentlich teurer aber auch sicherer ist, da es als Edelgas weder brennbar ist noch andere chemische Reaktionen eingeht.

### 2.1.5 Ein Luftballon in CO<sub>2</sub>



Abbildung 7: Luftballon in einem mit CO<sub>2</sub> befüllten Aquarium; eigenes Bild

Nach demselben Prinzip wie das vorige Beispiel funktioniert das auf Abbildung 7 dargestellte Experiment mit einen mit Luft gefüllten Ballon in einem mit CO<sub>2</sub> gefüllten Gefäß. Ein CO<sub>2</sub>-Molekül besteht üblicherweise aus 44 Nukleonen, damit ist die Dichte von CO<sub>2</sub> höher als die der Luft.

Diese Tatsache trägt auch stark zur Gefährlichkeit dieses Gases bei, da es sich in Senken wie beispielsweise Weinkellern oder Silos als Produkt von Gärungsprozessen ansammeln kann.

Für unser Experiment mit dem Luftballon haben wir ein leeres Aquarium mithilfe eines CO<sub>2</sub>-Feuerlöschers befüllt. Dabei gilt es vorsichtig und gefühlvoll vorzugehen, da das Gas bei zu starken Verwirbelungen nicht in ausreichender Konzentration im Aquarium bleibt. Ist das Gefäß befüllt, wird ein aufgeblasener Luftballon hineingelegt, dabei soll wiederum darauf geachtet werden, dass so wenig CO<sub>2</sub> wie möglich den Behälter verlässt. Ist auch dies gelungen, schwebt der Ballon aufgrund der geringeren Dichte der Luft.

#### 2.1.6 Der Wasserstoffballon

Eine sehr unterhaltsame Variante des Gasballons ist ein mit H<sub>2</sub> gefüllter Luftballon. Wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben, ist Wasserstoff durch seine geringe Dichte zwar grundsätzlich als Traggas sehr gut geeignet, andererseits ist das Gas hochentzündlich und daher auch sehr gefährlich. Befüllt man nun einen Luftballon mit reinem H<sub>2</sub> und befestigt ihn mit einer Schnur, kann man ihn mit einer geeigneten Vorrichtung in Brand setzten, wodurch er in einem Feuerball verbrennt. Dies passiert verhältnismäßig langsam, da der für die Verbrennung nötige Sauerstoff erst von außen zum Wasserstoff gelangen muss. Wird der Ballon mit Knallgasgemisch bestehend aus zwei Drittel Wasserstoff und einem Drittel Sauerstoff befüllt und ebenso entzündet, explodiert er in einem lauten Knall.

#### 2.1.7 Das Aluboot in SF<sub>6</sub>



Abbildung 8: Ein Aluschiffchen "schwimmt" in einem Aquarium mit Schwefelhexafluorid; eigenes Bild.

Dieser Versuch, der auf Abbildung 8 zu sehen ist, funktioniert nach demselben Prinzip wie der Luftballon im Aquarium, allerdings ist seine Wirkung auf das Publikum noch deutlich effektvoller. Mit Helium oder heißer Luft gefüllte Ballons sind uns aus der alltäglichen Erfahrung bekannt, ein Schiffchen, das in einem mit Gas gefüllten Behälter "schwimmt", ist schon etwas ganz anderes. Möglich ist das durch die Verwendung von Schwefelhexafluorid, kurz SF<sub>6</sub>.

Dabei handelt es sich um ein Gas, das unter Normalbedingungen farb- und geruchslos und

unbrennbar ist, ebenso ist es grundsätzlich ungiftig. Unter Normalbedingungen (im Englischen STP - "Standard Temperature and Pressure") versteht man eine Temperatur von 273,15 K bzw. 0°C sowie einen Druck von 1013,25 hPa. Ein SF<sub>6</sub>-Molekül besteht üblicherweise aus 146 Nukleonen, aus diesem Grund ist die Dichte des Gases ungefähr fünfmal so hoch wie die der Luft mit durchschnittlich 29 Nukleonen pro Teilchen, dadurch kann es ähnlich einer Flüssigkeit in einen Behälter gegossen werden. Die sechs Flouratome sind als perfekter Oktaeder um das Schwefelatom angeordnet, durch diese Struktur ist das Gas chemisch inert und verhält sich ähnlich einem Edelgas. Reaktionen sind zwar grundsätzlich möglich, allerdings nicht unter Normalbedingungen. Diese Eigenschaften prädestinieren es als Isolationsgas in der Hochspannungstechnik, als Löschgas und Schutzgas. SF<sub>6</sub> wurde sogar zum Befüllen von Autoreifen verwendet, dies ist allerdings mittlerweile verboten, da es das derzeit stärkste bekannte Treibhausgas ist. Das Treibhauspotential von Schwefelhexafluorid ist knapp 24.000mal höher als das von CO<sub>2</sub>. Da es in der Atmosphäre mit ungefähr 0,005 ppb im Gegensatz zu CO<sub>2</sub> mit 365 ppm in einer wesentlich geringeren Konzentration vorkommt, ist die Auswirkung auf den globalen Treibhauseffekt praktisch verschwindend, trotzdem ist ein verantwortungsvoller Umgang mit dem Gas angebracht. (chemie.de)

Die Tatsache, dass sich Schallwellen in Medien mit unterschiedlicher Dichte mit verschiedenen Geschwindigkeiten ausbreiten, führt bei SF<sub>6</sub> zu einem unterhaltsamen Nebeneffekt. Der Klang unserer Stimme ist stark von der Mischung unterschiedlicher Frequenzen abhängig, so sind neben der Grundschwingung zahlreiche verschiedene Obertöne vorhanden. Die Grundfrequenz wird durch die Stimmbänder gebildet, welche Obertöne sich in welcher Intensität ausbilden können, hängt von der

Form unseres Vokaltraktes, also Rachen-, Mund und Nasenraum ab. Ebenso spielen die Eigenschaften des darin enthaltenen Gases eine wichtige Rolle. Atmet man Helium ein, ein Gas in dem die Schallgeschwindigkeit höher als in der Luft ist, werden hohe Frequenzen stärker hervorgehoben. In SF<sub>6</sub> ist die Schallgeschwindigkeit geringer als in der Luft, wenn man dieses Gas einatmet, ist die Stimme für die nächsten Sekunden wesentlich tiefer, im Gegensatz zur "Mickey Mouse-Stimme" nach dem Einatmen von Helium, erinnert sie nach dem Einatmen von SF<sub>6</sub> eher an den bösen Wolf aus einschlägig bekannten Märchen. (Jewett, 1994, S. 221)

Bei diesem Versuch ist allerdings Vorsicht geboten, da das Gas eine höhere Dichte hat als unsere Atemluft, sollte man nach dem Einatmen jedenfalls darauf achten, das SF<sub>6</sub> wieder aus der Lunge zu bekommen, indem man beispielsweise einen Kopfstand macht, sich horizontal hinlegt oder einige Male in die Luft springt, da ansonsten die Gefahr eines Atemstillstandes droht.

#### 2.1.8 Cola light im Wasser



Abbildung 9: Die mit Cola-light gefüllte Dose schwimmt, die Dose mit Cola sinkt aufgrund der höheren Dichte ab; eigenes Bild.

Für diesen Versuch benötigt man einen durchsichtigen Behälter mit kaltem Wasser, eine Dose Coca-Cola und eine Dose Coca-Cola-light. Setzt man beide Dosen in das Wasser, kann üblicherweise beobachtet werden, dass die Dose mit Cola untergeht, während jene mit Cola-light an der Oberfläche schwimmt, wie es auf Abbildung 9 zu sehen ist. Woran kann das liegen? Jede der Dosen besteht aus einer Aluminiumhülle, der darin enthaltenen Flüssigkeit und einem Lufteinschluss. Die Dichte von Aluminium ist mit ungefähr 2,7 gcm<sup>-3</sup> wesentlich höher als die von Wasser, daher würde eine voll mit Wasser befüllte Dose untergehen. Die eingeschlossene Luft hat wiederum eine geringere Dichte als das umgebende Wasser, daher erhöht sie den Auftrieb. Geht man also davon aus, dass der Lufteinschluss in beiden Dosen das gleiche Volumen hat, muss der Unterschied in der Dichte der beiden Flüssigkeiten liegen. Tatsächlich wiegt die Dose mit Cola bei gleichem Volumen etwa

20 g mehr als die mit Cola-light, was daran liegt, dass Cola einen sehr hohen Zuckergehalt hat, der die Dichte der Flüssigkeit erhöht. Da der Lufteinschluss in der Praxis oft nicht exakt gleich groß ist, empfiehlt es sich, den Versuch zuerst mit den jeweiligen Dosen auszuprobieren. (Barke, Harsch, Marohn, & Krees, 2014, S. 63 f)

#### 2.1.9 Poröser Aluminiumschaum



Abbildung 10: Die Hohlräume machen den Großteil des Volumens von Aluminiumschaum aus; eigenes Bild.



Abbildung 11: Ein Stück Aluminiumschaum schwimmt an der Wasseroberfläche; eigenes Bild.

Erfahrungsgemäß haben Metalle eine wesentlich höhere Dichte als Wasser und gehen dadurch sofort unter. Metallschäume, durch verschiedene Verfahren die hergestellt werden können, haben bei gleichzeitig geschlossener Oberfläche einen hochporösen Kern und sind in dieser Weise unseren Knochen ähnlich. Diese poröse Struktur von Aluminiumschaum ist auf Abbildung 10 deutlich erkennbar. Als Werkstoffe erfreuen sich Metallschäume beispielsweise im Automobilbau hoher Beliebtheit, da aus ihnen erzeugte Bauteile einerseits leicht sind, andererseits gute Eigenschaften im Bereich der Energieabsorption und der Dämpfung von Vibrationen und Schall haben. Im Fall von Aluminiumschaum kann eine Dichte von ungefähr 0,5 gcm<sup>-3</sup> erreicht werden, was der Hälfte jener von Wasser entspricht. Legt man nun ein Stück Aluminiumschaum wie auf Abbildung 11 zu sehen in ein Gefäß mit Wasser, schwimmt es an der Oberfläche, anstatt unterzugehen. (Baumeister & Quitter)

#### 2.1.10 Eisenholz



Abbildung 12: Eisenholz in einem mit Wasser gefüllten Glas; eigenes Bild.

So wie Metalle üblicherweise im Wasser untergehen, lehrt uns die tägliche Erfahrung, dass Holz schwimmt. Auch in diesem Fall gibt es eine Ausnahme, das Holz des in Australien und Neuseeland beheimateten Eisenholzbaumes *Metrosideros umbellata*. Das Holz des Baumes aus der Familie der Myrtengewächse, der bis zu 18 m hoch und 1,5 m dick werden kann, hat eine Dichte von 1,04 gcm<sup>-3</sup>. Es handelt sich dabei um ein sehr hartes Holz, das außerordentlich schwer zu bearbeiten ist. (Lieberei & Reisdorff, 2012, S. 381)

Legt man ein Stück des Holzes, wie auf Abbildung 12 zu sehen ist, in ein mit Wasser gefülltes Glas, geht es tatsächlich unter. Da die Dichte des Holzes nur knapp über der von Wasser

liegt, empfiehlt es sich, das Holzstück vor der Vorführung einige Tage in Wasser einzulegen, damit es sich mit Wasser vollsaugen kann, da es bei einem ausgetrockneten Eisenholzstück durch eingeschlossene Luft passieren kann, dass es nicht untergeht.

#### 2.1.11 Das Galilei-Thermometer



Abbildung 13: Galilei-Thermometer; eigenes Bild.

Anders als der Name vermuten lässt, soll das auf Abbildung 13 zu sehende Galilei-Thermometer, das auch unter dem italienischen Namen Termometro Lento bekannt ist, nicht vom berühmten italienischen Physiker Galileo Galilei (1564 – 1642) erfunden worden sein. Als Erfinder gilt Ferdinand II, Großherzog der Toskana, aus der Familie der Medici. Einige Exemplare, die direkt auf den Großherzog zurückgehen sollen, befinden sich heute im Museo di Storia della Scienza in Florenz, dort unter dem Namen Termometro infingardi, was bedeutet "langsames Thermometer". Das Thermometer funktioniert nach einem sehr einfachen Grundsatz, wobei es sich das Archimedische Prinzip zunutze macht. In einer Flüssigkeit schweben mehrere Glaskugeln, die mit einer farbigen Flüssigkeit gefüllt sind. An diesen Kugeln hängt jeweils eine Plombe mit der jeweiligen Temperatur. Die Flüssigkeit dehnt sich etwa 10 Mal so stark aus wie das Glas, die Glaskugeln sind jeweils so eingestellt, dass sie bei der auf der Plombe vermerkten Temperatur gerade noch an die Oberfläche schwimmen und sinken, sobald die Temperatur höher ist. Damit das Thermometer leichter ablesbar ist, wird der Durchmesser der Glaskugeln so gewählt, dass er etwas größer ist, als der halbe Innendurchmesser des Zylinders, sodass die Kugeln nicht aneinander vorbeikönnen. Damit ist auf der untersten der schwimmenden Kugeln die

aktuelle Temperatur ablesbar. Auch unterschiedliche Farben erleichtern das Auseinanderhalten der verschiedenen Glaskugeln, außerdem ist das Thermometer dadurch optisch ansprechender, da es heute gerne als Raumschmuck verwendet wird. Tatsächlich handelt es sich im Prinzip sogar um ein digitales Messgerät, da nur ganze Messschritte, üblicherweise in Schritten von 1°C, und keine Zwischenwerte ablesbar sind. Der Hohlraum an der Oberseite spielt eine wichtige Rolle, da sich die Flüssigkeit wie oben beschrieben stärker ausdehnt als das Glas und dieses ansonsten bei höheren Temperaturen zerspringen könnte. (Ucke & Schlichting, 1994, S. 44 f)

#### 2.1.12 "Density Paradox"

Ein faszinierendes physikalisches Spielzeug des Herstellers Transparent Devices LLC ist das sogenannte Density Paradox. Es besteht aus einem Kunststoffzylinder, durch dessen Längsachse ein Metalldraht verläuft, der an beiden Enden gebogen ist. Wenn er sich auf Raumtemperatur befindet und man ihn in warmes Wasser legt, geht der Zylinder sofort unter und sinkt bis zum Boden des Gefäßes. Wartet man ungefähr eine Minute, beginnt er sich aufzurichten, bis er schließlich in Richtung der Oberfläche auftaucht. Sobald das Wasser in dem Gefäß abkühlt, sinkt das Density Paradox wiederum bis zum Boden. Wie ist das möglich?

Atome in Festkörpern versuchen den Abstand zu ihren Nachbaratomen einzunehmen, der dem Minimum des elektrischen Potentials der geladenen Teilchen entspricht. Sie befinden sich dabei allerdings nicht in einem Zustand der absoluten Ruhe, sondern schwingen um ihre Ruhelage, wobei die Amplitude dieser Schwingung von der Temperatur abhängt. Wird dem Körper Wärmeenergie zugeführt, wird diese von den Atomen aufgenommen, wodurch ihre potentielle und kinetische Energie steigt. Die Gesamtenergie setzt sich aus diesen beiden Beiträgen zusammen:

$$E = E_{kin} + E_{pot} ag{1.13}$$

Im Fall einer dreidimensionalen Schwingung gilt Folgendes für die Gesamtenergie:

$$E = 2 \cdot \frac{3}{2} k_B T = 3k_B T \tag{1.14}$$

Da die Boltzmannkonstante  $k_B$  eine Naturkonstante ist, steigt die Gesamtenergie linear zur Temperatur T. Bei Schwingungen im Bereich der klassischen Mechanik ist die Amplitude von der Energie, in diesem Fall der Temperatur, abhängig. Das bedeutet, dass sich bei Erwärmung eines Gegenstandes die Schwingungsamplitude der Atome um ihre Ruhelage erhöht und die Struktur des Festkörpers mehr Platz benötigt, wodurch er sich ausdehnt.

Der Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  gibt die Ausdehnung eines Materials abhängig von der Temperatur an. Experimentelle Befunde zeigen zwar, dass der Ausdehnungskoeffizient selbst wiederum schwach von der Temperatur abhängt und die reale temperaturabhängige Ausdehnung eines Gegenstandes daher nicht streng linear zur Temperatur erfolgt, allerdings können diese Abweichungen im Bereich zwischen 0°C und 100°C jedenfalls vernachlässigt werden. (Demtröder, Experimentalphysik 1 Mechanik und Wärme 6. Auflage, 2012, S. 260 ff)

Der Ausdehnungskoeffizient ist von der Atomstruktur und damit vom Material abhängig. Für Aluminium gilt beispielsweise  $\alpha=25\cdot 10^{-6}K^{-1}$  was bedeutet, dass sich ein 10 Meter langer Stab bei der Erwärmung um 10 K um 2,5 mm ausdehnt. Bestünde der Stab aus Glas mit  $\alpha=9\cdot 10^{-6}K^{-1}$ , läge diese Änderung bei 0,9 mm, bei Quarz mit  $\alpha=0.4\cdot 10^{-6}K^{-1}$  wären es nur noch 0,04 mm. Die

annähernd lineare Ausdehnung gilt für Flüssigkeiten sowie für Festkörper, wobei Phasenübergänge Diskontinuitäten darstellen und von dieser Beziehung, ebenso wie Dichteanomalien, nicht erfasst werden. So liegt der Ausdehnungskoeffizient von flüssigem Wasser bei  $2 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ . (Giancoli, 2010, S. 604 f)



Abbildung 14: Density Paradox in der beliebten 1,8 l Achtkantkaraffe von Luminarc; eigenes Bild.

Was hat dies mit unserem Density Paradox, wie es auf Abbildung 14 zu sehen ist, zu tun? Da der kleine Zylinder in flüssigem Wasser sowohl schwimmen als auch sinken kann, ist naheliegend, dass die Dichte des gesamten Körpers einschließlich des

Drahtes im Bereich der Dichte von Wasser mit 1000 kgm<sup>-3</sup> bei 4°C liegen muss. Da er sinkt, wenn sowohl er als auch das Wasser eine Raumtemperatur von ungefähr 20°C haben, muss seine Dichte in diesem Fall leicht über der des Wassers liegen. Die Gewichtskraft ist also etwas stärker als der Auftrieb. Das gilt umso mehr, wird der kalte Zylinder in warmes Wasser gelegt. Wenn man allerdings etwa eine Minute wartet, erwärmt er sich auf die Temperatur des ihn umgebenden Wassers, die Temperatur in dem in Abbildung 14 dargestellten Experiments, betrug ca. 55°C. Da der Kunststoffzylinder in Folge der Erwärmung aufsteigt, kann daraus geschlossen werden, dass seine Dichte nun etwas unter der des Wassers liegt, da die Auftriebskraft nun stärker ist als das Gewicht. Damit sich ein Körper so verhält wie das Density Paradox muss also Folgendes gelten: Die Dichte des Gegenstandes muss in etwa im Bereich von Wasser liegen, während sie bei kaltem Wasser leicht höher ist und bei höheren Temperaturen geringer. Demnach muss der Ausdehnungskoeffizient des hier verwendeten Kunststoffes höher sein als der von Wasser.

#### 2.1.13 Blei versus Styropor in Luft und Vakuum



Abbildung 15: Waage mit Bleigewicht und Styroporkugel in einer luftdichten Glocke; eigenes Bild.

Ein auf Abbildung 15 zu sehender Klassiker unter den Experimenten zum Auftrieb die Thema ist Vakuumglocke, in der sich eine Balkenwaage befindet, an deren Enden sich einmal eine Kugel aus Styropor und am anderen eine aus Blei befindet. Die Masse der Kugeln ist so gewählt, dass sich die Waage im Gleichgewicht befindet, solange die Glocke mit Raumluft gefüllt ist. Evakuiert man diese Glocke mit einer Vakuumpumpe, ist die Waage nicht mehr im Gleichgewicht und die Seite mit der Styroporkugel geht nach unten. Was kann der Grund dafür sein?

In unserem täglichen Sprachgebrauch gehen wir mit den Begriffen "Masse" und "Gewicht" ein wenig schlampig um. Der Begriff der Masse kann grundsätzlich als Maß für die Trägheit eines Körpers angesehen werden oder auch die Stoffmenge. Sie ist vom Aufenthaltsort unabhängig und gibt an, welche Kraft notwendig ist, um einen Körper um einen bestimmten Wert zu

beschleunigen. Dabei ist es irrelevant, ob er sich beispielsweise auf der Erde oder auf dem Mond befindet. Dieselbe Masse würde mit der gleichen Kraft an beiden Orten die gleiche Beschleunigung erfahren. Das Gewicht hingegen ist die aus der Gravitation resultierende Schwerkraft. Diese ist jedenfalls vom Ort abhängig, so beträgt die Schwerkraft aufgrund der geringeren Masse des Mondes im Vergleich zur Erde dort nur ungefähr ein Sechstel bei gleicher Masse. (Giancoli, 2010, S. 107 f)

Paradoxerweise zeigen Waagen üblicherweise die Masse des gewogenen Gegenstandes an, obwohl sie eigentlich das Gewicht als Kraft messen. Dies ist deshalb möglich, da auf der Erdoberfläche grundsätzlich ähnliche Bedingungen bezüglich der Schwerkraft vorherrschen. Ganz streng genommen ist auch die Gewichtskraft bei gleicher Masse auf der Erde nicht überall exakt dieselbe, da einerseits die Entfernung zum Massenmittelpunkt eine Rolle spielt, durch die Rotation des Planeten abhängig vom Abstand zum Äquator Fliehkräfte entstehen, und die Masseverteilung innerhalb der Erde nicht homogen ist. Diese Unterschiede fallen allerdings so gering aus, dass sie im täglichen Leben praktisch keine Rolle spielen. Würde man eine Waage von der Erde, die das Gewicht misst und daraus die Masse in Kg errechnet und ausgibt, auf dem Mond aufstellen, wäre das Ergebnis allerdings vollkommen unsinnig.

Nicht nur die oben genannten Effekte spielen für die Kraft, die einen Gegenstand nach unten zieht, eine Rolle, sondern auch der Auftrieb. Wie bereits besprochen, ist der Auftrieb die Gewichtskraft des verdrängten Fluides. Da Styropor aufgrund seiner geringeren Dichte im Vergleich zum Blei bei gleicher Masse mehr Volumen einnimmt, hat die Styroporkugel in diesem Fall einen größeren Auftrieb. Damit eine Waage für beide Körper bei normalem Luftdruck dasselbe Gewicht anzeigt, muss die Masse der Styroporkugel ein wenig höher sein, um den Auftrieb auszugleichen. Führt man dieses Experiment allerdings im Vakuum durch, in dem der Auftrieb mangels verdrängbaren Fluides nicht existiert, zeigt die Waage die etwas höhere Masse der Styroporkugel an.

#### 2.2 Aerodynamik

Dieses Teilgebiet der Fluiddynamik beschäftigt sich mit den Kräften, die durch das Umströmen von Gegenständen mit Luft oder anderen kompressiblen Gasen auftreten. Praktische Anwendungsgebiete sind vielfältig, sie reichen von der Luftfahrt über die Entwicklung von Autos oder die Optimierung der Form von Windrädern. Wenn die Teilchen eines Luftstroms auf die Oberfläche eines Körpers auftreffen, üben sie zunächst aufgrund des Widerstandes eine Kraft in Strömungsrichtung aus. Allerdings können je nach Form des Gegenstandes auch Kräfte quer zu dieser auftreten, die beispielsweise ein Flugzeug dazu bringen, abzuheben. (Demtröder, 2012, S. 229)

Im Groben können zwei Arten von Strömung unterschieden werden. Ist sie gleichmäßig wobei die Schichten des Fluids übereinander gleiten ohne sich zu berühren oder abzureißen, spricht man von einer laminaren Strömung. Die einzelnen Massepunkte des Fluids folgen einer gleichmäßigen Bahn, diese wird Stromlinie genannt. Das funktioniert je nach Form des Gegenstandes bis zu einer gewissen Geschwindigkeit, über dieser wird die Strömung turbulent, es bilden sich Wirbel aus, dadurch erhöht sich der Widerstand dramatisch. (Giancoli, 2010, S. 464 f)

Die gesamte Fluiddynamik ist eine einerseits sehr interessante aber auch hochkomplexe Thematik, die uns noch immer viele Rätsel aufgibt und Gegenstand zahlreicher Untersuchungen ist. Zahlreiche Vereinfachungen, Näherungen und Modellvorstellungen sind auch gegenwärtig notwendig, um sie in der Praxis handhaben zu können. Als wichtige Annahme gilt grundsätzlich die Kontinuitätsgleichung. Diese besagt im Wesentlichen, dass wenn ein Fluid inkompressibel ist, sich sein Volumen unter Druck also nicht ändert, bei der gleichen Durchflussmenge bei niedrigem Querschnitt die Geschwindigkeit hoch ist und umgekehrt:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \tag{2.1}$$

Das Produkt der durchflossenen Fläche mit der Geschwindigkeit bleibt konstant.

Eine bedeutsame Näherung für die Berechnung von fluiddynamischem Verhalten ist die Bernoulli'sche Gleichung. Es besagt, dass bei einer hohen Geschwindigkeit eines Fluids der Druck niedrig ist und bei einer niedrigen hoch. Damit gilt es als Energieerhaltungssatz für reibungsfreie Strömungen unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = konstant \tag{2.2}$$

Hierbei ist p der statische Druck, der Term  $\frac{1}{2}\rho v^2$ , der sich aus der Dichte  $\rho$  und dem Geschwindigkeitsquadrat  $v^2$  zusammensetzt, der Staudruck und  $\rho gh$  der Schweredruck, das Produkt der Dichte  $\rho$ , der Erdbeschleunigung g und der Höhe des Röhrenmittelpunkts über einem Bezugspegel. (Giancoli, 2010, S. 466 ff)

Auch wenn die Bernoulli'sche Gleichung eine hervorragende Näherung für das Verhalten inkompressibler Fluide darstellt, ist sie in manchen Fällen mit Vorsicht zu genießen, da sie auch die Anwendbarkeit der Kontinuitätsgleichung voraussetzt. Dies ist grundsätzlich in geschlossenen Objekten wie beispielsweise Rohren der Fall. Ihre Anwendung für das Verhalten von Flugzeugtragflächen und Segelbooten ist meist problematisch und liefert oft auf den ersten Blick zwar einleuchtende aber physikalisch falsche Erklärungen.

#### 2.2.1 Ein Ball im Luftstrom



Abbildung 16: Der Ball bleibt auch im Luftstrom, wenn die gesamte Vorrichtung seitwärts gekippt wird; eigenes Bild.

Für dieses Experiment verwendeten wir einen Styroporball und ein starkes Gebläse, das zunächst senkrecht hingestellt und eingeschaltet wurde. Danach wird der Ball in den Luftstrom gehalten und losgelassen. Die naheliegende Vermutung, dass der Ball vom Luftstrom weggeschleudert wird, erfüllt sich nicht, er tanzt etwa einen halben Meter über der Austrittsöffnung des Gebläses. Stößt man ihn leicht an, schwingt er wie an einer Feder um den Mittelpunkt des Luftstroms, bis er sich dort nach einiger Zeit wieder einfindet. An diesem Punkt wird die Gewichtskraft vom Luftwiderstand kompensiert, ein Kräftegleichgewicht stellt sich ein und der Ball schwebt. Kippt man, wie auf Abbildung 16 zu sehen ist, die gesamte Vorrichtung zur Seite, fällt der Ball nicht etwa zu Boden, er schwebt weiterhin im Luftstrom. Das Kräftegleichgewicht aus Schwerkraft und Luftwiderstand kann also nicht alleine dafür verantwortlich sein, dass ein Ball im Luftstrom schweben kann, es muss eine weitere rückstellende Kraft in Richtung des Zentrums des Luftstroms geben. Der Schlüssel dazu liegt in der Bernoulli-Gleichung, je höher die

Geschwindigkeit des Fluids ist, desto niedriger ist der Druck. Die Geschwindigkeit der ausströmenden Luft ist in der Mitte am höchsten, bei einer Auslenkung des Balles wird er aufgrund des Druckgefälles wieder in den Mittelpunkt des Luftstrahls gedrückt. (Otten, 1998, S. 208)

# 2.2.2 Schwebende Schraubenzieher und Glühlampen



Abbildung 17: Mit etwas Fingerspitzengefühl ist es möglich, Schraubenzieher und Glühlampen in einem Luftstrom schweben zu lassen; eigenes Bild.

Mit etwas Geschick ist es möglich, durch den in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Effekt auch andere, nicht kugelförmige Gegenstände in einem entsprechend starken Luftstrom zum Schweben zu bringen, wie Abbildung 17 zeigt. Für diese Experimente verwendeten wir einen Kompressor mit einer Druckluftpistole. Das Platzieren des Schraubenziehers im Luftstrom ist einerseits anspruchsvoller als derselbe Versuch mit der Glühlampe,

allerdings übersteht er aufgrund seiner Robustheit auch mehrere Fehlschläge. Die Zweitgenannte tanzt aufgrund ihrer runden Form sehr schön in der schnellen Strömung, verzeiht wegen ihrer Fragilität allerdings auch weniger Fehlversuche.

#### 2.2.3 Ball im Wasserstrahl



Abbildung 18: Tischtennisball schwebt in einem Wasserstrahl; eigenes Bild.

Das Experiment auf Abbildung 18 zeigt uns, dass der oben beschriebene Effekt auch für Flüssigkeiten gilt. Platziert man einen Tischtennisball in einem Wasserstrahl, tanzt er ebenso um dessen Mitte wie in einem Luftstrom. Grund dafür ist wiederum die Tatsache, dass der Strahl in der Mitte die höchste Geschwindigkeit hat und gemäß der Bernoulli-Gleichung in dieser Richtung ein Druckgradient besteht, der den Ball in die Mitte des Strahls drückt und dort hält. Mit etwas Übung ist es möglich, mit einem einfachen Gartenschlauch einen Tischtennisball einige Meter entfernt von der Austrittsöffnung tanzen zu lassen.

### 2.2.4 Durchflussmesser



Abbildung 19: Dieser Durchflussmesser verwendet Kugeln mit unterschiedlichen Durchmessern; eigenes Bild.

Das in Abbildung 19 zu sehende Experiment ist grundsätzlich als Atemtrainer für Personen mit Lungenbeschwerden gedacht. Die Vorrichtung besteht aus drei Rohren mit gleichem Durchmesser, die an der unteren Seite Öffnungen haben, durch welche die Luft einströmen kann. An der Oberseite sind sie mit einem gemeinsamen Abluftschlauch verbunden, durch den die Luft eingesaugt wird. In den Rohren befinden sich Kunststoffkugeln mit leicht unterschiedlichen Durchmessern. Ab einer bestimmten Durchflussmenge, die bei jeder Kugel unterschiedlich ist, überwiegt der Strömungswiderstand und die Kugeln werden nach oben gesaugt. In Abbildung 19 ist der Durchfluss groß genug

um die linke Kugel an der Oberseite zu halten, die Rechte bleibt noch liegen und, die Mittlere bewegt sich gerade hinauf, wie an der Bewegungsunschärfe zu erkennen ist.

## 2.2.5 Das Cola-Mentos-Experiment



Abbildung 20: Cola-Fontäne nach der Auslösung des Mentos-Mechanismus; eigenes Bild.

Dieses Experiment auf Abbildung 20 sollte eine spektakulärere Version des Ball-im-Wasserstrahl-Versuchs zeigen. Anstatt des Wasserschlauchs wurde eine Flasche Coca-Cola light verwendet, in die mittels einer geeigneten Vorrichtung mehrere Stück Mentos geworfen wurden. Ein großer Vorteil dieser Apparatur besteht auch darin, dass sie mithilfe einer Schnur aus sicherer Entfernung gestartet werden kann, womit vermieden werden kann, dass der Experimentator der klebrigen Fontäne ausgesetzt ist. Die Vorrichtung hat auch eine Öffnung nach oben, durch die die Flüssigkeit nach oben schießen kann, ebenso kann darauf ein Tischtennisball gelegt werden, der dann im Flüssigkeitsstrahl schweben soll.

Sobald der Mechanismus ausgelöst wird, fallen die Bonbons in die Flasche. Mentos sind rau und verfügen über eine im Verhältnis zum Volumen große Oberfläche. Dadurch unterbrechen sie die Anziehungskraft, welche die bipolaren Wassermoleküle aufeinander ausüben, dies fördert die Ausbildung von Bläschen. Aufgrund ihrer Dichte sinken die Mentos rasch ab, erzeugen dabei Bläschen, welche bei ihrem Aufstieg die Bildung von weiteren anregen. Zusätzlich enthalten Mentos Gummi arabicum, der die Oberflächenspannung von Wasser senkt, ebenso wie das in Coca-Cola light enthaltene

Süßungsmittel Aspartam. Aus diesem Grund funktioniert das Experiment deutlich besser mit der light-Version des Erfrischungsgetränks. Das senken der Oberflächenspannung alleine ist noch nicht ausreichend für eine derartige Fontäne, die große Oberfläche der Mentos liefert dem in der Flüssigkeit gelösten CO<sub>2</sub> die nötigen Keime zur Blasenbildung um schlagartig in die gasförmige Phase überzugehen. (Muir, 2008)

Leider wurde beim in Abbildung 20 gezeigten Experiment das Ziel, den Tischtennisball in der Cola-light-Fontäne schweben zu lassen nicht erreicht. Wie am Bild zu erkennen ist, wurde er vom Strahl zur Seite gedrückt und fiel zu Boden. Allerdings hat dieser kleine Schönheitsfehler den Unterhaltungswert des Experiments weder beim Test noch bei der tatsächlichen Vorführung im Rahmen unserer Weihnachtsvorlesung wesentlich beeinträchtigt.

## 2.2.6 Magnus-Geschoß



Abbildung 21: Das Magnus-Geschoß auf seinem Flug durch den Hörsaal; eigenes Bild.

Wie ist es möglich, einen Eckball direkt im Tor zu versenken? Auch abgeschlagene Golfbälle fliegen oft nicht in gerader Linie, sondern führen, je nachdem ob und wie sie angeschnitten werden, eine Querbewegung aus. Ursache für die Ablenkung quer zur ursprünglichen Richtung

eines Gegenstandes ist der vom deutschen Physiker und Chemiker Heinrich Gustav Magnus (1802 - 1870) erstmals physikalisch erklärte und nach ihm benannte Effekt. Wird ein zylinderförmiger Gegenstand wie in Abbildung 22a ohne Eigenrotation von Luft umströmt, ist die Geschwindigkeit der Luft an beiden Seiten von der Strömungsrichtung aus gesehen gleich groß, die Stromlinien umstreichen den Zylinder symmetrisch. Verfügt der Gegenstand allerdings wie in Abbildung 22c zu sehen ist über eine Eigenrotation, ist die Geschwindigkeit, mit der die Luft an ihm vorbeiströmt an einer Seite größer als auf der anderen. Nach der Bernoulli'schen Gleichung ist der Druck geringer, je höher die Strömungsgeschwindigkeit ist. Da Druck Kraft pro Fläche ist und die Fläche auf beiden Seiten gleich groß ist, sind die Kräfte, die von beiden Seiten auf den Zylinder einwirken, ebenfalls nicht gleich groß. Die aus dieser Differenz resultierende Nettokraft ist jene, die von der Seite auf das Objekt einwirkt und es quer zur ursprünglichen Fortbewegungsrichtung auslenkt. (Demtröder, Experimentalphysik 1 Mechanik und Wärme 6. Auflage, 2012, S. 229 f)

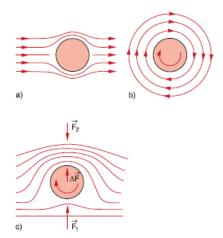


Abbildung 22: Schematische Darstellung des Stromlinienverlaufs bei einem Zylinder mit und ohne Eigenrotation; Quelle: Demtröder, Experimentalphysik 1, Springer Spektrum, S 230

Unser Magnus-Geschoß auf Abbildung 21 besteht aus einem Kunststoffstab, auf dem ein Kartonzylinder mittels gespannten Gummibändern nach vorne geschossen werden kann. Dabei wird der Zylinder nicht nur nach hinten gezogen, sondern mit den Gummibändern mehrere Male verdreht, sodass er beim Loslassen mit einer Rotation um die eigene Achse nach vorne fliegt. Da in diesem Fall die Rotationsachse mit der Flugachse zusammenfällt, gibt es keine ablenkende Kraft auf die Seite, der Magnus-Effekt stabilisiert allerdings die Flugbahn des Zylinders.

## 2.2.7 Eine Luftkissenbahn zeigt das Verhalten von Gasteilchen



Abbildung 23: Kleine Magnete zeigen den Effekt der Diffusion in Gasen. Das obere Bild zeigt die Ausgangslage vor dem Einschalten des Kompressors, beim Unteren sind die "Gasteilchen" bereits durchmischt; eigenes Bild.

Das Experiment auf Abbildung 23 zeigt einerseits die Levitation von Gegenständen mithilfe eines Luftkissens, andererseits veranschaulicht Grundsätze es die thermodynamischer Teilchenbewegungen. Ein Kompressor pumpt durch einen Schlauch Luft zwischen zwei Glasblatten, wobei die obere mit Löchern versehen ist, durch welche die Luft ausströmen kann. Über dieser Platte befinden sich kleine zylinderförmige Magnete, wobei die Pole so orientiert sind, dass zwischen allen eine Abstoßung herrscht. Sobald der Kompressor eingeschaltet wird, beginnen die Magneten auf einem Luftpolster reibungsfrei zu schweben. Da Zwischen den Magneten Abstoßung herrscht, bewegen sie sich ähnlich wie Gasteilchen, wobei Effekte wie die Diffusion, die Brown'sche Bewegung oder die Resublimation demonstriert werden können.

### 2.2.8 Ballon Helikopter

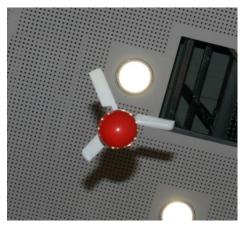


Abbildung 24: Der Ballon-Helikopter schraubt sich in Richtung der Hörsaaldecke; eigenes Bild.

Das Experiment auf Abbildung 24 beruht auf einem simplen aber wirkungsvollen Prinzip. In der Mitte eines Kunststoffrotors wird ein aufgeblasener Luftballon befestigt. Durch die Spannung der Außenhaut wird die Luft aus dem Ballon gedrückt, durch jedes Rotorblatt führt ein dünnes Rohr, das den Luftstrom in Richtung der Hinterseite des Blattes leitet. Durch diesen Rückstoß wirkt ein Drehmoment auf jedes Rotorblatt und der Hubschrauber beginnt zu rotieren. Aufgrund des Anstellwinkels der Rotorblätter schraubt er sich so lange nach oben, bis sich der Ballon entleert hat.

Diese Technik wird auch für den Antrieb echter Hubschrauber untersucht, da dieser Blattspitzenantrieb den Vorteil bietet, dass er im Gegensatz zu einem herkömmlichen Rotor kein Drehmoment auf den Helikopter ausübt. Die gesamte Antriebsleistung kann für die Fortbewegung verwendet werden, da kein Heckrotor für den Drehmomentausgleich benötigt wird. Die Ideen zur Umsetzung sind vielfältig, sie reichen von Kompressoren zur Luftkomprimierung bis zum Anbringen kleiner Strahltriebwerke an den Blattspitzen. Alle diese Konstruktionen haben den gemeinsamen Nachteil eines hohen Kraftstoffverbrauchs und einer erheblichen Lärmentwicklung, die Technologie des Blattspitzenantriebes bei Hubschraubern ist noch nicht über das Versuchsstadium hinausgelangt. (Klußmann & Nalik, 2004, S. 36)

## 2.3 Magnetismus

Ein seit Jahrtausenden bekanntes, täglich präsentes aber trotzdem bis heute äußerst rätselhaftes Phänomen ist der Magnetismus. In einem Gebiet in Kleinasien namens Magnesia wurden Steine, die einander anzogen, gefunden. Sie wurden benannt nach dem Ort ihrer Entdeckung und so sprechen wir heute noch von "Magneten". Bereits im 18. Jahrhundert versuchten Forscher einen Zusammenhang zwischen dem Phänomen der Elektrizität und jenem des Magnetismus festzustellen. Dass ruhende elektrische Ladungen und Magneten sich gegenseitig nicht beeinflussen war bekannt. Im 19. Jahrhundert beobachtete der dänische Physiker Hans Christian Oerstedt (1777-1851) den Ausschlag einer Kompassnadel in der Nähe eines Drahtes, als er an diesen eine Spannung anlegte und Strom fließen ließ. Er folgerte daraus, dass elektrische Ströme Magnetfelder erzeugen und Elektrizität und Magnetismus miteinander verwandt sein müssen.

Magnete haben immer zwei Pole, sie werden als Nord- und Südpol bezeichnet. Gleichnamige magnetische Pole stoßen sich ab, während zwischen unterschiedlichen eine Anziehung herrscht. Im Gegensatz zu elektrischen Feldern ist eine Trennung der beiden nicht möglich. Teilt man zum Beispiel einen Stabmagneten in der Mitte, erhalten wir nicht einen Nordpol und einen Südpol, sondern zwei Magneten, die jeweils über beide Pole verfügen. Wir schließen daraus, dass es keine magnetischen Ladungen gibt und bis heute sind keine einzeln auftretenden magnetischen Monopole beobachtet worden. Starke magnetische Effekte sind nur bei wenigen Stoffen wie Eisen, Cobalt, Nickel und einigen Legierungen vorhanden, man bezeichnet sie als ferromagnetisch nach *ferrum*, dem lateinischen Wort für Eisen. Aber auch alle anderen Stoffe zeigen magnetische Effekte, die üblicherweise so schwach sind, dass sie im täglichen Leben praktisch keine Rolle spielen und nur mit sehr empfindlichen Instrumenten gemessen werden können. (Giancoli, 2010, S. 919)

Die Erzeugung von Magnetfeldern kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Wie bereits von Oerstedt nachgewiesen, schlägt eine Kompassnadel tangential aus, sobald sie in die Nähe eines stromdurchflossenen Leiters gebracht wird. Daraus schließen wir, dass die magnetischen Feldlinien konzentrische Kreise um den Leiter bilden. Um dem dritten Newtonschen Axiom zu genügen, übt nicht nur der durchflossene Leiter eine Kraft auf den in der Nähe befindlichen Magneten aus, dies gilt auch umgekehrt, auch Magnete üben eine Kraft auf stromdurchflossene Leiter aus. (Giancoli, 2010, S. 922)

Neben elektrischen Strömen können auch magnetische Materialien Magnetfelder erzeugen. Der bekannteste Effekt ist der Ferromagnetismus, wir begegnen ihm täglich unter anderem in Form von Magneten an Kühlschränken und Tafeln, Verschlüssen von Kästen, Magnetstreifen auf Bankomat- und Kreditkarten. Ähnlich einem elektrischen Dipol kann ein Stabmagnet ebenso als magnetischer Dipol angesehen werden, er verfügt ebenso über zwei Pole, die räumlich voneinander getrennt sind, auch der Verlauf der Feldlinien um den Magneten entspricht dem der elektrischen eines elektrischen Dipols.

Betrachtet man diesen Stabmagneten nun mikroskopisch, finden sich winzige Bereiche in der Größenordnung von höchstens einem Millimeter, die als Domänen oder Weiss'sche Bezirke bezeichnet werden. Jede davon verhält sich wie ein kleiner Magnet mit eigenem Nord- und Südpol. In einem gewöhnlichen Eisenstück, das nicht magnetisiert wurde, sind diese zufällig ausgerichtet, sodass von dem gesamten Stück keine magnetische Kraft ausgeht, da sich die entgegen gerichteten Felder überlagern und dadurch aufheben. Anders sieht es aus, wenn durch ein äußeres Magnetfeld diese Domänen in dieselbe Richtung angeordnet werden, man erhält dann einen Magneten. In der Praxis ist der Effekt gut beobachtbar, wenn man mit einem starken Permanentmagneten mehrere Male in dieselbe Richtung über einen Gegenstand aus Eisen wie einen Schraubenzieher streicht. Durch diesen Effekt ist es auch möglich, mit einem Magneten zuvor nicht magnetische Gegenstände wie beispielsweise Stecknadeln aufzuheben, da sich deren Domänen durch das Magnetfeld ebenso ausrichten. Der Effekt des Magnetismus kann auch wieder verlorengehen, sobald die Domänen nicht mehr in dieselbe Richtung ausgerichtet sind. Erreicht werden kann dies durch starke Erschütterungen oder Erwärmen über eine bestimmte Temperatur, die als Curie-Temperatur bezeichnet wird. Sie liegt im Fall von Eisen bei 1043 K, bei einer Erwärmung über diese Temperatur verschwinden sämtliche magnetischen Effekte. (Giancoli, 2010, S. 966 f)

Neben dem bereits kennengelernten Ferromagnetismus gibt es zwei weitere magnetische Effekte. Paramagnetische Materialien bestehen selbst aus Molekülen oder Ionen, die selbst über ein magnetisches Dipolmoment verfügen. Diese sind ähnlich wie die Domänen in ferromagnetischen Stoffen zunächst zufällig angeordnet und richten sich beim Anlegen eines externen Magnetfeldes parallel zu diesem aus, dadurch ist das Feld in ihrem Inneren etwas größer, als das außerhalb. Beim Diamagnetismus, der für den erstaunlichen Effekt in Kapitel 2.3.5 verantwortlich ist, besitzen die Moleküle kein permanentes magnetisches Dipolmoment. Beim Anlegen eines äußeren magnetischen Feldes werden magnetische Dipole erzeugt, die dem externen Feld entgegengerichtet sind. Das gesamte Magnetfeld ist dadurch geringer. Tatsächlich ist der Diamagnetismus in jedem Material vorhanden, er wird allerdings in den meisten Fällen vom Ferromagnetismus oder Paramagnetismus überlagert. (Giancoli, 2010, S. 970 f)

#### 2.3.1 Das Earnshaw-Theorem

Wer hat noch niemals versucht, einen Permanentmagneten über einem anderen zum Schweben zu bringen? Egal, wie sehr man sich dabei bemüht, die Hand ruhig zu halten und das perfekte Gleichgewicht zu finden, es will einfach nicht gelingen. Sobald man ihn loslässt, kippt er oder er dreht sich und die beiden Magneten kleben aneinander. Allen, die deshalb an ihrer Fingerfertigkeit zweifeln zum Trost: Es kann so nicht funktionieren. Den Grund dafür legte der englische Geistliche und Physiker Samuel Earnshaw (1805-1888) dar.

Damit sich ein Gegenstand dauerhaft an einem Ort befinden kann, muss er sich in einem stabilen Gleichgewicht befinden. Das bedeutet, dass er eine rücktreibende Kraft erfährt, wenn er aus seiner Ruhelage ausgelenkt wird. Sehr anschaulich ist das Beispiel einer Kugel in einer runden Schüssel. Sie wird sich immer am tiefsten Punkt befinden und gibt man der Kugel einen Stoß, wird sie diesen wiederum aufsuchen, bis sie von der Reibung gebremst, schließlich dort liegenbleibt. In der Physik nennt man einen solchen Punkt Potentialminimum. Da die Natur bestrebt ist, die potentielle Energie so gering wie möglich zu halten, suchen physikalisch Systeme, ob es sich nun um die Kugel in der Schüssel oder Elektronen in Atomorbitalen handelt, mit Vorliebe dieses Minimum auf. Eine Voraussetzung für dieses Verhalten ist allerdings, dass ein solches überhaupt vorhanden ist.

In einem Raum, der frei von Quellen und Senken ist, ist die Divergenz aller Felder der Wechselwirkungen, deren Stärke proportional zu  $r^{-2}$  ist, gleich 0. Dies betrifft die Gravitation sowie die elektromagnetische Wechselwirkung, die in Form von elektrischen bzw. magnetischen Feldern auftritt. Diese Konsequenz folgt direkt aus den Maxwell-Gleichungen, auf die Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet. In diesem quellen- und senkenfreien Raum, in dem die Divergenz der Felder verschwindet, gibt es keine Minima, sondern nur Sattelpunkte. Im Gegensatz zu einem Minimum ist ein Sattelpunkt allerdings instabil, da das Potential an einer Seite steigt, während es auf der anderen absinkt und bei absinkendem Potential keine rücktreibende Kraft existiert (Bronstein, Semendjajew, Musiol, & Mühlig, 2012, S. 877). Es gibt also mindestens eine Richtung, in welcher keine rücktreibende Kraft auf den Gegenstand wirkt, sondern er eine Kraft, die ihn von diesem Sattelpunkt entfernen will, erfährt. (Earnshaw, 1842, S. 97 ff)

Um einen Gegenstand trotzdem mit magnetischen oder elektrischen Feldern an einer Stelle festzuhalten und ihn in einem stabilen Gleichgewicht levitieren zu lassen, gilt es, dieses Earnshaw-Theorem zu überlisten. Dies kann beispielsweise gelingen, indem man dem System einen Freiheitsgrad entzieht, also eine Bewegung in eine Richtung nicht zulässt, wie Experimente in diesem Kapitel zeigen werden. Eine andere Möglichkeit, auf die in Kapitel 2.4 und 2.5 eingegangen wird, ist die Stabilisierung durch aktiv geregelte elektrische oder elektromagnetische Felder.

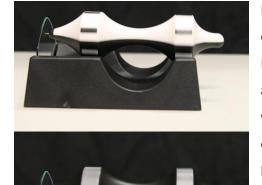
## 2.3.2 Permanentmagnete in der Schwebe



Abbildung 25: Permanentmagnete schweben übereinander entlang einer zentralen Stange; eigenes Bild.

Eine sehr einfache aber auch wirkungsvolle Methode, das Earnshaw-Theorem zu umgehen ist es, eine Achse mechanisch auszuschalten. Die vermutlich naheliegendste Möglichkeit dies zu erreichen ist es, scheibenförmige Magnete auf einer senkrechten Stange so anzuordnen, dass sich gleichnamige Pole gehgenüberliegen und sich die Scheiben gegenseitig abstoßen. Die Kraft, die die Magneten aufeinander ausüben, ist hier jedenfalls stark genug, um die oberen Magnete schweben zu lassen, da diese durch die Befestigung an der Achse keine Möglichkeit haben sich umzudrehen. Beim genauen Hinsehen ist auf Abbildung 25 gut zu erkennen, dass die Scheiben nicht parallel übereinander schweben, sie wirken etwas an der Stange verkeilt. Dies ist eine Folge des Earnshaw-Theorems, würden die Magnete nicht daran gehindert, würden sie sofort kippen und mit den ungleichnamigen Polen aneinanderkleben.

# 2.3.3 Die schwebende Magnetwalze





eigenes Bild.

Beim Versuch auf Abbildung 26 handelt es sich um eine mit einem Magneten versehene Walze, die durch ein Magnetfeld in der Schwebe gehalten wird. Allerdings muss auch in diesem Fall eine Bewegungsrichtung blockiert werden, daher befindet sich an einem Ende eine durchsichtige Kunststoffplatte, welche die Walze daran hindert, sich in dieser Richtung zu entfernen. Ist sie einmal richtig positioniert, kann man die Walze in Schwingungen oder Rotation versetzen, sie bleibt relativ stabil in ihrer Position.

#### 2.3.4 Das Levitron



Abbildung 27: Das Levitron - der Kreisel schwebt aufgrund seiner Rotation über dem Magnetring; eigenes Bild.

Eine ungleich effektvollere Umgehung des EarnshawTheorems als das schlichte Befestigen von ringförmigen
Permanentmagneten an einer zentralen Stange bietet
das sogenannte Levitron. Bei diesem auf Abbildung 27
zu sehenden Experiment macht man sich die Tatsache
zunutze, dass ein Gegenstand stabil um seine
Symmetrieachse mit dem größten Trägheitsmoment
rotieren kann. In diesem Fall ist die Rotationsenergie
minimal und der Körper hat das Bestreben, die
Ausrichtung seiner Rotationsachse beizubehalten.
Diese Tatsache macht man sich beispielsweise beim
Diskuswerfen oder einem Kreiselkompass zunutze, der
möglichst frei aufgehängt seine Ausrichtung immer

beibehält. Der Kreisel des Levitrons besteht aus einem starken Permanentmagneten, weitere Magnete befinden sich im Ring über dem der Kreisel schwebt. Die magnetischen Feldlinien des Levitrons sind auf Abbildung 28 zu sehen. Die Pole sind so ausgerichtet, dass sich Kreisel und Ring gegenseitig abstoßen. Ohne die Rotation, die die senkrechte Achse des Kreisels sozusagen festhält, würde dieser sofort kippen und auf den unteren Ring knallen. Tatsächlich erfordert das Starten dieser Vorrichtung ein gewisses Maß an Geduld und Fingerspitzengefühl, da der Kreisel einerseits mit Gewichtsscheibchen

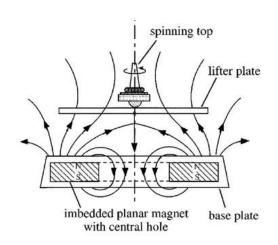


Abbildung 28: Darstellung der magnetischen Feldlinien des Levitron; Bild: web.mit.edu.

exakt so ausbalanciert werden muss, damit er einerseits nicht sofort nach unten fällt, auf der anderen Seite entschwebt ein zu leichter Kreisel sofort in eine beliebige Richtung davon. Zusätzlich muss sich der Ring genau in der Waagrechten befinden, wozu die drei Stellschrauben über den silbernen Beinen dienen. Schon bei sehr kleinen Abweichungen zieht der Kreisel ebenfalls davon. Die Gewichtsscheiben sind am oberen Ende nur mit einem kleinen Gummiring befestigt, dadurch verbringt man während dem Einrichten des Levitrons einige Zeit am Boden auf der

Suche nach ebendiesen Scheibchen und dem winzigen schwarzen Gummiring. Das Starten funktioniert über einen Elektromotor, der ihn in eine schnelle Rotation versetzt. Entfernt man diesen dann vorsichtig und hebt den Kreisel mittels einer Kunststoffvorrichtung leicht an, wird man jedenfalls für seine Mühen belohnt. Wie von Geisterhand schwebt der Kreisel einige Minuten über dem Metallring.

## 2.3.5 Diamagnetisches Schweben



Abbildung 29: Ein Graphitplättchen schwebt stabil über Permanentmagneten; Quelle: www.supermagnete.com.

Wie bereits beschrieben, besitzen Moleküle von diamagnetischen Materialien wie auf Abbildung 29 kein permanentes Dipolmoment, die Dipole werden durch ein externes Magnetfeld erzeugt. Ein diamagnetischer Gegenstand verhält sich in einem Magnetfeld ähnlich einem Metallstück: Es muss eine Kraft überwunden werden, die den Körper bestrebt ist, wieder hinauszudrängen. Das Verhalten beim Metallstück liegt daran, dass Änderungen des Magnetfeldes Wirbelströme induzieren, die Abstoßung wird durch die Lorentz-Kraft auf

die Wirbelströme bedingt. Sobald es nicht mehr bewegt wird, erlöschen diese Wirbelströme aufgrund des ohmschen Widerstandes. Im Gegensatz dazu wirkt die Kraft bei diamagnetischen Materialien weiter, woraus wir schließen, dass die Kreisströme nur von der Feldstärke und nicht der Änderung des Feldes abhängen. In diesem Fall rotiert das gesamte Atom mit einer bestimmten Frequenz, der sogenannten Larmor-Frequenz, um die Richtung des externen  $\vec{B}$ -Feldes. (Meschede, 2010, S. 403)

Bereits 1845 hat Michael Faraday, der Begründer der Feldtheorie, über den von ihm entdeckten Diamagnetismus berichtet. Er hatte herausgefunden, dass grundsätzlich alle Gegenstände auf Magnetfelder reagieren. Von ihm stammt auch die Bezeichnung des Phänomens sowie der Ausdruck Paramagnetismus als Gegenbegriff dazu. Faraday sah den Diamagnetismus und den Paramagnetismus als getrennt voneinander existierende Erscheinungen an und unterschied auch nicht zwischen dem Para- und dem Ferromagnetismus. (Tricker, 1974, S. 104)

Das Phänomen des Diamagnetismus sorgt in jedem Fall für eine Abstoßung des Körpers vom  $\vec{B}$ -Feld, dabei ist es nicht bedeutsam, ob man sich von der Seite des Nord- oder des Südpols nähert. Es ist dadurch möglich, beispielsweise ein Graphitplättchen über einem starken Permanentmagneten stabil in der Schwebe zu halten. Diese Tatsache widerspricht dem bereits kennengelernten Earnshaw-Theorem, nach dem es nicht möglich ist, mit einem statischen Feld ein Objekt in einem stabilen Gleichgewicht zu halten. Allerdings gibt es von diesem Theorem Ausnahmen, eine davon stellt das diamagnetische Schweben dar, eine weitere wird an späterer Stelle in dieser Arbeit behandelt. Die Ausnahme beim diamagnetischen Schweben begründet sich darin, dass sich die Feldlinien des

Diamagneten antiparallel zum externen Magnetfeld ausrichten, während die Ausrichtung der durch das Earnshaw-Theorem beschriebenen Feldlinien parallel geschieht. Dadurch ist auch das induzierte magnetische Moment antiparallel zum externen Feld. (Gibbs & Geim, 1997)

Beispiele für Substanzen mit sehr stark ausgeprägten Diamagnetismus sind Wismut und Kohlenstoff. Aus diesem Grund kann ein dünnes Graphitblättchen über einem sehr starken Permanentmagneten aus einer Neodymlegierung schweben. Auch Wasser zählt zu den diamagnetischen Materialien, der Effekt ist hier allerdings wesentlich schwächer ausgeprägt, sodass sehr starke Elektromagneten notwendig sind, um aus Wasser bestehende Objekte schweben zu lassen. Dass dies grundsätzlich möglich ist, bewies der Physiker Andre Geim gemeinsam mit Michael Berry, indem er einen Frosch über einem starken Magneten schweben ließ. Die dafür verwendete magnetische Flussdichte betrug 16,5 Tesla, der Betrieb dieses Elektromagneten benötigte 4 MW. Nicht zuletzt aus diesem Grund haben wir in der Vorlesung auf eine live-Vorführung dieses Experimentes verzichtet und es als Video gezeigt. (Berry & Geim, 1997, S. 311)



Abbildung 30: Ein lebender Frosch schwebt in einem starken Magnetfeld; Quelle: www.slate.com.

Der auf Abbildung 30 zu sehende schwebende Frosch brachte Andre Geim im Jahr 2000 den Ig-Nobelpreis. Dieser Preis wird seit 1991 vergeben um wissenschaftliche Leistungen zu ehren, die "Menschen zuerst zum Lachen, dann zum Nachdenken bringen". Dazu meinte der Physiker, dass nach seiner Erfahrung Menschen ohne Sinn für Humor üblicherweise keine sehr guten Wissenschafter seien. Tatsächlich hatten im Jahr 1997, als die ersten Bilder des schwebenden Frosches auftauchten, viele an einen Aprilscherz gedacht. Im Jahr 2010 erhielt Geim gemeinsam mit seinem

Kollegen Konstantin Novoselov den Nobelpreis für Physik aufgrund ihrer Experimente mit dem Material Graphen. Andre Geim ist damit weltweit der einzige Träger des Nobelpreises und des Ig-Nobelpreises. (Lewis, 2014)

### 2.4 Elektrostatik

Schon im antiken Griechenland war bekannt, dass ein an Textilien geriebener Stab aus Bernstein kleine Partikel wie Staubteilchen anzieht. Bernstein besteht aus versteinertem Baumharz, das griechische Wort dafür ist elektron. Heute ist dieser Effekt im Alltag sehr gut bei Gegenständen aus Kunststoff beobachtbar, so kann man mit einem zuvor an Stoff geriebenen Lineal kleine Papierschnipsel aufheben oder mit einer Haarbürste nach ihrer zweckmäßigen Verwendung einen Wasserstrahl ablenken. Dies funktioniert besonders gut bei preiswerten Modellen, die nicht gegen statische Aufladung geschützt sind. Auch das Berühren einer Türschnalle nach dem Gehen auf einem Kunststoffteppichboden kann zu einem elektrisierenden Erlebnis werden. Bringt man zwei solcherart aufgeladene Kunststofflineale so an, dass sie sich leicht bewegen können und verringert den Abstand dazwischen, wird schnell sichtbar, dass sie einander abstoßen. Bringt man nun einen aufgeladenen Glasstab in die Nähe eines der Lineale, lässt sich beobachten, dass zwischen ihm und einem der Kunststofflineale eine Anziehungskraft herrscht. Aus diesen Experimenten schloss man, dass sich jedes geladene Objekt in eine von zwei Klassen einteilen lässt. Es wird in jedem Fall von einem der beiden Gegenstände, also dem Glasstab oder dem Kunststofflineal angezogen und vom jeweils anderen abgestoßen. Hieraus wurde nun gefolgert, dass es genau zwei Arten der elektrischen Aufladung gibt und bis heute gibt es keine Anhaltspunkte dafür, dass es noch andere Arten der elektrischen Ladung gibt. Ihre heutigen Bezeichnungen als positiv bzw. negativ erhielten die Ladungsarten vom amerikanischen Wissenschafter, Erfinder und Staatsmann Benjamin Franklin (1706-1790). Die Zuordnung geschah zu diesem Zeitpunkt völlig willkürlich, die Ladung am Glasstab bezeichnete er als positiv, jene am Bernsteinstab, der sich in diesem Fall so verhält wie ein heutiges Kunststofflineal, als negativ. An der Konvention wird bis heute festgehalten. Franklins Gedanken gingen allerdings noch weiter und so schloss er, dass wenn immer eine Ladungsmenge auf einem Gegenstand erzeugt wurde, auf dem anderen die genau entgegengesetzte entstand. Somit postulierte er das Gesetz der Erhaltung der elektrischen Ladung. (Giancoli, 2010, S. 731 f)

Zu den bisher genannten verfügt die elektrische Ladung über eine zusätzliche Eigenschaft, sie ist quantisiert. Jede elektrische Ladung eines isoliert auftretenden Teilchens ist ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung  $e=1,602\cdot 10^{-19}\,As$ . Die zugehörige Einheit (C) wurde nach dem französischen Physiker Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) benannt. Wie diese ursprünglich bestimmt wurde, warum uns diese Entdeckung eine Lektion in Sachen wissenschaftlicher Integrität erteilte und vielleicht sogar ein Nobelpreis fragwürdig vergeben wurde, wird in Kapitel 2.4.1 näher ausgeführt. Die Kraft, die elektrisch aufgeladene Teilchen aufeinander ausüben, ist im Vergleich zur Gravitation  $10^4$ mal stärker. Sie ist nur deshalb im Alltag kaum zu bemerken, weil die Ladungen im Allgemeinen ausgeglichen sind. Welche Kräfte tatsächlich dahinterstecken lässt sich erahnen, wenn

man sich einen Blitz vor Augen führt. Die zwischen zwei Ladungen herrschende Kraft ist proportional zu ihrem Produkt. Somit verhält sie sich ähnlich zur Gravitation. Ebenso ist die Kraft vom Abstand proportional zu r<sup>-2</sup> abhängig. Somit lautet das Coulomb Gesetz:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ'}{r^2} \vec{r} \tag{4.1}$$

 $\vec{F}$  ist die zwischen den Ladungen Q und Q' mit dem Abstand r herrschende und in Richtung des Einheitsvektors  $\vec{r}$  wirkende elektrostatische Kraft.  $\epsilon_0$  ist die Dielektrizitätskonstante, sie beschreibt die Durchlässigkeit des Vakuums für elektrische Felder und ihr Wert beträgt

$$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \, AsV^{-1} m^{-1}. \tag{4.2}$$

(Meschede, 2010, S. 316 f)

#### 2.4.1 Der Millikanversuch

Die Entdeckung des Elektrons wird heute dem britischen Physiker Joseph John Thomson (1856-1940) zugeschrieben. Schon zuvor waren Experimente mit Kathodenstrahlröhren durchgeführt und dabei ein Leuchten beobachtet worden. Thomson war zwar nicht der erste, der dieses Leuchten beobachtete, allerdings vertrat er bald die Überzeugung, dass für dieses Leuchten kleine negativ geladene Teilchen verantwortlich waren und begann Experimente vorzunehmen um diese zu erforschen. Ebenso war er der Meinung, dass diese winzigen Teilchen Bestandteile von Atomen und nicht etwa selbst Atome oder Ionen sind. Das Wort "Entdecker" ist in diesem Zusammenhang mit Vorsicht zu genießen, da weder Thomson noch sonst jemand in der Geschichte jemals ein Elektron "gesehen" hat. Noch heute gibt uns dieses winzige, geladene Teilchen zahlreiche Rätsel auf. (Giancoli, 2010, S. 934)

#### 2.4.1.1 Das Tröpfchenexperiment

Nachdem sich die Idee eines kleinsten elektrisch geladenen Teilchens bald durchgesetzt hatte, gingen die Bestrebungen dahin, diese Elementarladung experimentell zu bestimmen. 1910 arbeitete ein junger Physikprofessor an der Universität von Chicago und war mit der Frage beschäftigt, wie sich die Ladungen kleinster Partikel messen ließen. Die Lösung präsentierte sich in einer ziemlich simplen Versuchsanordnung. Der Mann mit dem Namen Robert Millikan setzte die Düse eines Parfümzerstäubers auf eine Pumpe und erzeugte damit winzig kleine Tröpfchen aus Öl. Diese wurden zwischen zwei Metallplatten geschickt, die an eine Batterie angeschlossen waren, wodurch sich zwischen den Platten ein elektrisches Feld bildete. Auch die winzigen Öltröpfchen haben aufgrund der Schwerkraft grundsätzlich das Bestreben nach unten abzusinken. Durch das elektrische Feld bewegten

sich manche von ihnen nach oben und manche blieben in der Schwebe, sie levitierten also. Nun schloss Millikan, dass die Geschwindigkeit mit der die Tröpfchen aufstiegen von deren Ladung abhängt. Je mehr Elementarladungen in Form von Elektronen sich an ihnen befanden, desto schneller stiegen sie hoch. Am interessantesten waren tatsächlich die schwebenden Öltröpfchen, da die Bestimmung ihrer Masse dadurch möglich war, sie mit dem Mikroskop zu vermessen. Die Dichte des Öls war bekannt, demnach konnte die Massenbestimmung einfach durchgeführt werden. Nachdem für mehrere Tröpfchen gleichzeitig Ladung und Masse bestimmt worden waren, fiel Millikan auf, dass die Ladung immer einen bestimmten Wert oder dessen Vielfaches betrug. Als nächsten Schritt galt es, diese Ladungsmenge zu messen, sie wurde von Millikan als e bezeichnet. Noch im gleichen Jahr veröffentlichte er die ersten 38 Einzelergebnisse, die aber aufgrund des sensiblen Messverfahrens voneinander sehr stark abwichen. Also begann der junge Professor seine Ergebnisse in Qualitätskategorien von "befriedigend" bis "hervorragend" einzuteilen. Sieben Messwerte, die nach der Meinung von Millikan von minderer Qualität waren, wurden ausgeschieden. Er erntete Ruhm und Kritik. So kritisierte der österreichische Physikprofessor Felix Ehrenhaft Millikans Ergebnisse heftig. Ehrenhaft war selbst mit der Thematik befasst und hat eigene Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse allerdings eine erheblich stärkere Streuung aufwiesen. Er zweifelte nicht nur die Messwerte selbst an, sondern auch die Behauptung von Millikan, er hätte die kleinste elektrische Ladung bestimmt. So ging Ehrenhaft von der Existenz noch viel kleinerer Ladungseinheiten aus und interpretierte auch seine eigenen Messwerte in diese Richtung. 1913 veröffentlichte Millikan 28 neue und sehr präzise Messungen mit geringer Streuung und betonte, dass dies keine ausgewählte Gruppe von Messungen sondern deren Gesamtheit sei. Millikans Notizbüchern ließ sich allerdings anderes entnehmen. Der Wissenschaftshistoriker Gerald Holton fand Aufzeichnungen von mindestens 140 Messungen worunter jene ausgewählt worden waren, die mit den theoretischen Überlegungen des amerikanischen Physikprofessors am ehesten im Einklang standen. Der Verdacht, dass Millikan in diesem Fall nur ausgesuchte Messergebnisse veröffentlicht hat, erhärtet sich durch Bemerkungen in seinen Notizen, die manche Einzelwerte mit "schön, unbedingt veröffentlichen, wunderschön" oder andere mit "sehr niedrig, irgendwas stimmt nicht" kommentierten. Wären diese Manipulationen nicht erst später bekannt geworden, hätte Millikan wohl kaum 1923 den Nobelpreis für Physik erhalten. Währenddessen mühte sich der Österreicher Felix Ehrenhaft mit einer erheblich höheren Streuung der Werte ab, obwohl ihm eine bessere Messapparatur zur Verfügung stand. (Zankl, 2006, S. 21 ff)

# 2.4.1.2 Alleiniger Nobelpreis für Millikan

Ein weiterer Vorwurf wird gegen Robert Millikan vom Wissenschaftshistoriker Alexander Kohn erhoben. Zu Beginn der Messungen wurden mit dem Zerstäuber winzige Wassertröpfchen erzeugt und

im elektrischen Feld zum Schweben gebracht. Der Nachteil dieser Tröpfchen ist, dass sie sehr schnell verdunsten, was eine exakte Messung praktisch unmöglich macht. Ein junger Physikstudent namens Harvey Fletcher hatte die Idee, anstatt des Wassers Öl zu verwenden. Diese verdunsten nicht und erleichtern die exakte Vermessung gewaltig. Fletcher zeigte dem Professor sein Zerstäubersystem, der davon so begeistert war, dass dieser seine Experimente fortan ebenfalls nur mehr mit Öl durchführte. Kurze Zeit später publizierte Millikan seine Ergebnisse, wobei er allerdings Fletcher nicht als Koautor nannte, sondern nur im methodischen Teil erwähnte. Gerechtfertigt wurde dieses Vorgehen durch die Diplomordnung der Chicagoer Universität, die den Studenten das völlig unabhängige Arbeiten garantieren sollte, eine Nennung Fletchers hätte bei der Beurteilung seiner Diplomarbeit möglicherweise zu Problemen geführt. Allerdings entsteht nicht gerade der Eindruck Robert Millikan hätte nichts unversucht gelassen, die Ehre mit seinem Studenten zu teilen. Auch ohne die oben genannten Manipulationsvorwürfe erstrahlt die alleinige Vergabe des Nobelpreises an Millikan ohne Berücksichtigung von Ehrenhaft und Fletcher in keinem besonders guten Licht. (Zankl, 2006, S. 23 f)

## 2.4.1.3 Kann zu viel Respekt schädlich sein?

Der amerikanische Physiker Richard Feynman führt in seiner Autobiographie eine weitere interessante Beobachtung im Zusammenhang mit der Messung der Elementarladung an. So liegt der ursprünglich von Millikan gemessene Wert für die Elementarladung ein wenig neben dem tatsächlichen, später gemessenen, da ein unzutreffender Wert für die Viskosität der Luft verwendet worden sei. Natürlich beschäftigten sich nicht nur die bereits genannten Millikan, Fletcher und Ehrenhaft mit der Messung der Elementarladung, viele Forscher versuchten sich an ihrer Bestimmung. Trägt man nun die ermittelten Werte als Funktion der Zeit auf, lässt sich feststellen, dass der nächste ermittelte Wert ein bisschen über dem von Millikan lag, der nächste wiederum ein wenig höher und so fort, bis sich die Werte bei einer höheren als der von Millikan ermittelten Zahl einpendeln. Feynman schließt daraus, dass die Wissenschafter bei Werten, die weit über dem von Millikan lagen, davon ausgingen, dass diese nicht stimmen konnten. Also wurden sie ausgeschieden, indem die Forscher Gründe für die Abweichungen suchten und auch fanden. Bei Zahlen, die wiederum in der Nähe des erwarteten Wertes lagen, wurde nicht so genau nachgeprüft. Beruhigenderweise meint Feynman, dass diese "Krankheit" mittlerweile ausgestorben sei. (Feynman, 2013, S. 454)

### 2.4.2 Paul-Falle



Abbildung 31: Paul-Falle. Gut erkennbar sind die beiden Endkappenelektroden und die Ringelektrode; Bild: TU-Graz Dr. Lammegger.

Das bereits erwähnte Earnshaw-Theorem, besagt, dass statische Felder kein stabiles Gleichgewicht, in dem ein Körper bestrebt ist nach einer Störung wieder in die Ausgangslage zu gelangen, erzeugen können. Dies gilt nicht nur für magnetische, sondern auch für elektrische Felder. Um lonen, also elektrisch geladene Teilchen in der Schwebe zu halten beziehungsweise levitieren zu lassen, muss man sich also eines Tricks bedienen.

Abbildung 31 zeigt eine Vorrichtung, mit

deren Hilfe geladene Teilchen eingefangen werden können, die Paul-Falle, die Paul-Ionenkäfig oder Quadrupol-Ionenfalle genannt wird. Sie wurde vom deutschen Physiker Wolfgang Paul entwickelt, der dafür im Jahr 1989 den Nobelpreis für Physik erhielt. Zusätzlich zu der Möglichkeit Ionen einzufangen, dient sie auch als Spektrometer mit dessen Hilfe die Masse und die Ladung der eingefangenen Teilchen bestimmt werden kann. Die Paul-Falle besteht im Wesentlichen aus drei Elektroden, einer Ringelektrode und zwei Endkappenelektroden, die hyperbolisch geformt sind. Die beiden letztgenannten unterscheiden sich durch die Anzahl der Löcher, eine verfügt über eine einzelne Öffnung in der Mitte, durch die periodisch Teilchen geschleust werden, die andere hat mehrere kleine Öffnungen, durch welche die Ionen zu einem Detektor gelangen. Die Ringelektrode besitzt ebenfalls eine hyperbolische Form, sie ist symmetrisch zwischen den beiden Endkappenelektroden platziert. Durch das Anschließen einer Spannung an die Ringelektrode, während die beiden Endkappenelektroden geerdet sind, entsteht aufgrund der parabolischen Form der Elektroden ein ideales Quadrupolfeld, welches wiederum einen Potentialtopf erzeugt. Bei der angelegten Spannung handelt es sich um eine sehr hochfrequente Wechselspannung, deren Frequenz sich im Bereich von Radiowellen befindet. Um aus dem Verhalten von Ionen in einem Quadrupolfeld sinnvolle Schlüsse ziehen zu können, war es notwendig, sich mit einer Theorie der Bewegung dieser Teilchen in einem solchen Feld auseinanderzusetzen. Diese Suche dauerte nicht lange, die Beschreibung des Verhaltens von Ionen in einem Quadrupolfeld liefern die Lösungen der Mathieuschen Differentialgleichungen, auf deren Behandlung an dieser Stelle verzichtet wird. Wie bereits erwähnt, lassen sich mithilfe der Paul-Falle Ionen nicht nur einfangen, es ist auch eine Bestimmung ihrer Masse und Ladung möglich.

Dies wird durch die Änderung der Amplitude ihrer Schwingung durch Variation des an die Ringelektrode angelegten Feldes erreicht. Da unterschiedliche Ionen über ebenso unterschiedliche Masse/Ladungs-Verhältnisse verfügen, werden sie abhängig von der Stärke ihrer Schwingungsamplitude zu bestimmten Zeitpunkten aus dem Potentialtopf geschleudert. Bei schweren Teilchen ist die Beschleunigung durch die Änderung des Feldes nicht ausreichend, sodass sie nicht gehalten werden. Sind die Teilchen wiederum zu leicht, werden sie so stark beschleunigt, dass sie die Falle verlassen, bevor sie umgepolt werden. Dieses Verfahren ist im englischen Sprachraum als *mass-selective axial instability mode* bekannt, es verhalf der Paul-Falle seit den 1980er Jahren auch zu kommerziellen Erfolgen. (March, 1997, S. 351 ff)

#### 2.4.3 Linearfalle



Abbildung 32: Milchpulver in einer Linearfalle; eigenes Bild.

Die auf Abbildung 32 gezeigte Linearfalle ist ebenfalls eine Quadrupolfalle, die zur Umgehung des Earnshaw-Theorems mit dynamischen Feldern arbeitet. Wie die Paul-Falle wird sie mit sehr hochfrequenten Wechselspannungen versorgt, durch die ein Quadrupolfeld entsteht. Ihren Namen erhält sie durch die Tatsache, dass die Teilchen aufgrund der Bauform in einer geraden Linie zwischen den Elektroden schweben. Sie funktioniert ausgezeichnet mit sehr kleinen noch sichtbaren Partikeln wie Bärlappsamen, Milch- oder Kakaopulver. Die schwebenden Teilchen sind in Abbildung 32 deutlich erkennbar, um sie besser erkennen zu können, haben wir sie mithilfe eines grünen Laserpointers beleuchtet.

### 2.4.4 Elektrostatischer Schweber



Abbildung 33: Der Zauberstab mit eingebautem Van-de-Graaff-Generator lässt ein Gebilde aus Folie schweben; eigenes Bild.

Ein einfaches, günstiges aber auf jeden Fall faszinierendes Spielzeug ist der Zauber-Schwebestab auf Abbildung 33. Bei Betätigung eines Knopfes ist es möglich, ein Gebilde aus Polyesterfolie wie von Geisterhand auf Distanz zu halten. Da wir an dieser Stelle davon ausgehen, dass es keine Geister gibt, muss es für diesen Effekt eine handfeste physikalische Begründung geben. Diese erhält man bei der näheren Betrachtung des "Zauberstabes". In seinem Inneren verbirgt sich ein kleiner Van-de-Graaff-Generator, wie er schematisch auf Abbildung 34 zu sehen ist. An dessen unterem Ende befindet sich eine Spitzenelektrode, die über einen Transformator mit einer sehr hohen Spannung versorgt wird. Diese wird von einem Band aus isolierendem Material passiert, auf das von der Elektrode die Ladungen

aufgesprüht werden. Dieses Band ist mit einem Motor angetrieben und läuft über einen Leiterkamm am oberen Ende, an dem die Ladungen abgenommen werden, wieder zur Spitzenelektrode zurück. Der Leiterkamm ist wiederum mit der Innenseite einer Kugelschale aus leitendem Material verbunden.

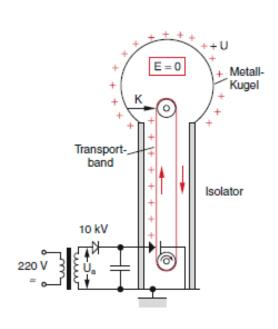


Abbildung 34: Schematische Darstellung eines van-de-Graaff-Generators; Quelle: Demtröder, Experimentalphysik 2, Springer Spektrum, S 19.

Ähnlich einem Förderband werden also Ladungen von der unteren Spitzenelektrode zur Kugelschale aus Metall transportiert. Da das Band selbst isoliert, wird ein Ladungsausgleich verhindert. Auf diese Art und Weise lassen sich äußerst hohe Potentialdifferenzen erreichen. (Demtröder, 2012, S. 19)

Haben die Ladungen an der Oberseite des Stabes sowie jene der Folie das gleiche Vorzeichen, herrscht aufgrund der Coulomb-Kraft eine Abstoßung zwischen den beiden Gegenständen. Diese ist aufgrund der hohen Potentialdifferenz, die mithilfe des Van-de-Graaff-Generators erzeugt wird, so stark, dass sie die Folie mehrere Meter über dem Stab schweben lassen kann.

## 2.5 Elektromagnetismus

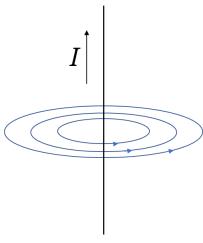


Abbildung 35: Magnetische Feldlinien um einen geraden Leiter, durch den ein Strom I fließt; Eigene Darstellung.

Wie bereits erwähnt, entdeckte Hans Christian Oerstedt den Zusammenhang der Phänomene Elektrizität und Magnetismus durch den Ausschlag einer Kompassnadel in der Nähe eines stromdurchflossenen Drahtes. Im einfachsten Fall erzeugt ein gerader Draht, durch den ein stationärer Strom fließt, ein magnetisches Feld. Seine magnetischen Feldlinien verlaufen wie auf Abbildung 35 zu sehen in Form konzentrischer Kreise um den Draht. Das Magnetfeld ist stärker bei höherer Stromstärke durch den Draht und wird schwächer, je größer die Entfernung vom Draht ist. Man kann dies auch so ausdrücken, dass die magnetische Feldstärke B in der Nähe des Drahtes direkt proportional zur Stromstärke I und indirekt proportional zur Entfernung r vom Draht ist:

$$B \sim \frac{I}{r} \tag{5.1}$$

Solange der Abstand vom Draht wesentlich geringer ist als dessen Länge gilt Folgendes:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r} \tag{5.2}$$

Die Proportionalitätskonstante  $\frac{\mu_0}{2\pi}$  enthält die magnetische Feldkonstante  $\mu_0$ , ihr Wert beträgt

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \, kg \, m \, A^{-2} s^{-2}. \tag{5.3}$$

(Giancoli, 2010, S. 951)

# 2.5.1 Das Ampère'sche Gesetz

Die Gleichung 5.2 ist auf die Beschreibung der Stärke des Magnetfeldes um einen langen geraden Draht beschränkt. Schon kurz nach Oerstedts Entdeckung gelang dem französischen Physiker André Marie Ampère (1775 - 1836) die Formulierung eines allgemeinen Gesetzes, das die Beziehung zwischen Strom in einem Draht mit beliebiger Form und dem den Draht umgebenden Magnetfeld beschreibt, indem es das Kurvenintegral des Magnetfeldes entlang eines geschlossenen Weges mit dem durch die eingeschlossene Fläche fließenden Strom in Beziehung setzt:

$$\oint \vec{B} \ d\vec{s} = \mu_0 I \tag{5.4}$$

Es bietet sich an, die Gültigkeit dieses Gesetzes für den Fall des langen geraden Drahtes zu überprüfen, indem wir den Betrag des Magnetfeldes in einem Punkt mit dem Abstand r zum Draht bestimmen. Da von einer Kreisform der magnetischen Feldlinien ausgegangen wird, ist der Weg entlang dessen integriert wird, ein Kreis mit dem Radius r, sein Umfang beträgt  $2r\pi$ .

$$\oint \vec{B} \, d\vec{s} = \oint B \, ds = B \oint ds = B(2r\pi) \tag{5.5}$$

Beim Einsetzen in die Gleichung 5.4 erhält man nach entsprechender Umformung wieder die Gleichung 5.2:

$$B(2r\pi) = \mu_0 I \text{ woraus folgt } B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r}$$
 (5.6)

Das Ampère'sche Gesetz hält der Überprüfung im einfachsten Fall stand, tatsächlich geht man heute aufgrund vielfacher experimenteller Überprüfung von seiner Allgemeingültigkeit aus. (Giancoli, 2010, S. 954 f)

## 2.5.2 Elektromagnete

Um ein bei gleichem Abstand stärkeres Magnetfeld zu erzeugen, kann man einerseits die Stromstärke, andererseits die Anzahl der Drähte erhöhen. Eine Möglichkeit dies zu erreichen ist es, den Draht aufzuwickeln, das Ergebnis ist eine Spule. Im Fall einer sehr langen Spule verläuft das nahezu homogene Feld parallel zur Spulenachse. Die Feldstärke innerhalb der Spule kann dabei sehr groß werden, sie ist die Summe der Feldstärken der einzelnen Windungen. Darüber hinaus kann die Feldstärke zusätzlich erhöht werden, indem das Innere der Spule mit einem Eisenkern versehen wird. Wie bereits in Kapitel 2.3 ausgeführt, zählt Eisen zu den ferromagnetischen Stoffen, die Domänen richten sich nach dem äußeren Magnetfeld aus und verstärken dieses. Der Vorteil eines solchen Elektromagneten ist, dass man das Magnetfeld leicht ein- und ausschalten kann, sowie die Feldstärke über die Wahl der Stromstärke variieren kann. Genau diese Eigenschaft macht es möglich, mittels Elektromagneten Gegenstände dauerhaft levitieren zu lassen.

Das Earnshaw-Theorem beschreibt grundsätzlich Anordnungen aus Permanentmagneten, mit denen es nicht möglich ist, Gegenstände dauerhaft in der Schwebe zu halten. Neben der bereits behandelten mechanischen Stabilisation einer Achse oder dem Phänomen des Diamagnetismus besteht die Möglichkeit, einen Körper mithilfe von aktiv geregelten Elektromagneten levitieren zu lassen. Diese werden über Rückkopplungsschaltungen gesteuert und sind daher in der Lage auf jede Änderung der Ausrichtung und Position des Objekts entsprechend zu reagieren und es wieder in die Ausgangslage zurückzubringen. Solche Vorrichtungen wurden schon 1938 beschrieben, sie konnten Lasten von über 200 kg schweben lassen. (Scharlau, Nordmeier, & Schlichting, 2003)

## 2.5.3 Alufolie auf Induktionsplatte



Abbildung 36: Alufolie schwebt kurzzeitig über einer Induktionskochplatte; eigenes Bild.

Das auf Abbildung 36 gezeigte Experiment lässt sich leicht zuhause nachmachen, vorausgesetzt man verfügt über eine Induktionskochplatte. Diese hat üblicherweise eine Induktionsspule aus Kupfer, die an eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 20 bis 100 kHz angeschlossen wird. Die Spule produziert ein magnetisches Wechselfeld, das in einen entsprechenden Gegenstand Wirbelströme induziert. Wirbelströme und die daraus folgende

magnetische Hysterese bei ferromagnetischem Material erwärmen den Körper, beispielsweise einen Kochtopf oder eine Pfanne. (Llorente, Monterde, Burdío, & Acero, 2002)

Legt man nun ein Stück Alufolie auf eine Induktionskochplatte und schaltet diese ein, induziert das magnetische Wechselfeld der Kochplatte Wirbelströme in der Folie. Alufolie ist grundsätzlich nicht ferromagnetisch, allerdings erzeugen diese Wirbelströme wiederum Magnetfelder, die aufgrund der Lenz'schen Regel dem Magnetfeld der Induktionskochplatte entgegengerichtet sind. Die Alufolie wird also von der Platte abgestoßen und schwebt kurzzeitig über dieser.

## 2.5.4 Spule schwebt über Aluminium

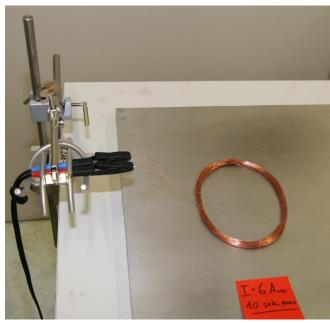


Abbildung 37: Versuchsanordnung zur schwebenden Spule über einer Aluminiumplatte - man beachte den Warnhinweis rechts unten; eigenes Bild.

Dieses Experiment funktioniert grundsätzlich ähnlich wie die schwebende Alufolie in 2.5.3, im Prinzip wurde einfach die Versuchsanordnung umgedreht. Abbildung 37 zeigt eine auf einer Aluminiumplatte liegende Kupferspule, wird sie an eine Spannung angeschlossen, induziert Magnetfeld wiederum Wirbelströme im Aluminium. Die durch diese Wirbelströme induzierten Magnetfelder sind gemäß der Lenz'schen Regel ebenfalls Verursacherfeld der Spule entgegengerichtet und sorgen für eine Abstoßung. In diesem Fall wird allerdings eine entsprechend hohe Stromstärke benötigt um die im Vergleich zur Alufolie sehr schwere Kupferspule anzuheben. Diese betrug in unserer Demonstrationsvorlesung 6 A, aus diesem Grund wurde die Vorrichtung nur wenige Sekunden eingeschaltet.

#### 2.5.5 Elihu Thomson-Versuch



Abbildung 38: Aufbau des Elihu Thomson-Versuchs; eigenes Bild.

Eine sehr eindrucksvolle Demonstration der Lenz'schen Regel bietet der auf Abbildung 38 zu sehende Ringversuch von Elihu Thomson. Eine Spule umschließt das untere Ende eines langen Eisenkerns, über den ein Ring aus Aluminium gestülpt wird. Die gesamte Anordnung kann als Transformator angesehen werden, bei dem die untere Spule die Primärspule und der Aluminiumring die Sekundärspule darstellt. Legt man an die Primärspule eine Spannung an, bildet sich ein Magnetfeld aus, das wiederum einen Ringstrom induziert, dessen Magnetfeld jenem der Primärspule entgegengerichtet ist. Dadurch kommt es zur einer Abstoßung, die bewirkt, dass der Ring einige Meter in die Luft katapultiert

wird. Am besten funktioniert der Versuch mit Wechselspannung. In diesem Fall erhält der Aluminiumring bei jedem Wechsel der Polarität einen Stoß, bei einer Frequenz von 50 Hz ergeben sich daraus 100 Stöße pro Sekunde, beim Anlegen einer Gleichspannung tritt der Effekt nur einmal auf.

# 2.5.6 Schwebende Erdkugel



Abbildung 39: Aktiv geregelte Elektromagnete halten den kleinen Globus in der Schwebe; eigenes Bild.

Eine beliebte Tischdekoration für Technikbegeisterte ist die schwebende Erdkugel auf Abbildung 39, die man von zahlreichen Herstellern in unterschiedlichen Ausführungen erwerben kann. Ist die Vorrichtung eingeschaltet, schwebt der kleine Globus innerhalb der Halterung, aufgrund der geringen Luftreibung behält er eine einmal mitgegebene Rotation sehr lange bei.

Dies funktioniert nur, weil die magnetischen Felder durch Elektromagnete erzeugt werden, die wiederum durch eine entsprechende Steuerung aktiv geregelt werden. Doch wie funktioniert diese Regelung? Man bedient sich in zahlreichen Fällen dieser Art von Levitation eines sogenannten Hall-Sensors. Dieser ist ein Halbleiterbauteil, der die Spannung einer Schaltung entsprechend dem Vorhandensein und der Stärke eines magnetischen Feldes ändert. Der Grund für den vom amerikanischen Physiker Edwin Herbert Hall im Jahr 1879 entdeckten Effekt ist die Lorentz-Kraft. Bewegte Ladungen werden durch ein Magnetfeld abgelenkt, führt ein Leiter an einem Magnetfeld vorbei, ist die Ladungsverteilung nicht mehr homogen, wodurch eine Potentialdifferenz quer zur Stromrichtung vorhanden ist, die vom Hall-Sensor gemessen werden kann. Da diese Sensoren nur Spannungen im Bereich von Millivolt abgeben, benötigen sie eine zusätzliche Verstärkerschaltung. Handelsübliche Hall-Sensoren sind in der Lage, den Strom in Abhängigkeit der Entfernung eines Magnetfeldes etwa 1000 Mal pro Sekunde anzupassen. (Jürß & Rudolph, 2008)

# 2.5.7 Flyte



Abbildung 40: die Flyte schwebt leuchtend über ihrer Plattform; Bild: www.flyte.se.

Nach demselben Prinzip wie die oben beschriebene Erdkugel, nur noch wesentlich schöner, ist die auf Abbildung 40 zu sehende schwebende Tischlampe des schwedischen Startup-Unternehmens Flyte Europe Ltd. In der mit Holzfurnier verkleideten Basis befinden sich aktiv geregelte Magnetspulen, welche die Lampe in der Schwebe halten. Das Platzieren der Lampe auf der Plattform erfordert Geduld und eine sehr ruhige Hand, dankenswerter Weise erhält man dazu eine Schablone, mit deren Hilfe sich die richtige Position recht gut ermitteln lässt. Hat man sie einmal zum Schweben gebracht, verkraftet die Lampe kleinere Auslenkungen mühelos, eine Rotation

hält sie über mehrere Stunden aufrecht. Die Magnetfelder sind nicht nur in der Lage, die Lampe über ihrer Basis schweben zu lassen, es kann auch eine geringe Spannung induziert werden, die ausreicht, um eine Leuchtdiode mit Strom zu versorgen.

## 2.6 Supraleitung

Im Jahr 1911 machte der niederländische Physiker Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) die Entdeckung, dass sich der elektrische Widerstand von destilliertem Quecksilber unterhalb einer bestimmten Temperatur praktisch auf null reduziert. 1913 erhielt er dafür den Nobelpreis für Physik. Mittlerweile wurde nachgewiesen, dass eine solche Temperatur, auch Sprungtemperatur oder charakteristische Temperatur T<sub>C</sub> genannt, für beinahe alle Metalle sowie einer Vielzahl von chemischen Verbindungen existiert. Diese Sprungtemperatur liegt bei den meisten Materialien bei wenigen Kelvin, die sehr aufwändige und auch teure Kühlungen mittels flüssigem Helium notwendig machen. Obwohl zunächst eine obere Grenze für die Supraleitung mit T<sub>C</sub> < 20 K vorausgesagt worden war, wurde von Georg Bednorz und Karl Alexander Müller im Jahr 1986 Supraleitung in Cupratverbindungen bei Sprungtemperaturen von bis zu 35 K entdeckt. Dies löste einen wahren Boom in der Suche nach Supraleitern, die bei höheren Temperaturen funktionieren, aus, wobei Materialien mit Sprungtemperaturen von bis zu T<sub>C</sub> = 130 K entdeckt werden konnten. Besonders bedeutsam war das Überschreiten der Marke von  $T_C$  = 77,15 K, dies ist die Siedetemperatur von  $N_2$ , das bedeutet, dass die Kühlung mithilfe von flüssigem Stickstoff erfolgen kann, was die entsprechenden Kühlapparaturen bedeutend einfacher und auch kostengünstiger macht. Diese werden heute Hochtemperatursupraleiter bezeichnet. (Demtröder, 2010, S. 471 ff)

1957 veröffentlichten John Bardeen, Leon Cooper, nachdem der Charakter Sheldon Cooper aus der Fernsehserie The Big Bang Theory benannt ist, und Robert Schrieffer die heute nach den Anfangsbuchstaben ihrer Namen bekannte BCS-Theorie. In sehr vereinfachter Form besagt sie, dass Elektronen in Supraleitern gekoppelte Paare bilden, diese Kopplung entstammt der Wechselwirkung zwischen den Elektronen mit dem Kristallgitter. Das erste übt eine Störung auf das Gitter aus, während das Gitter wiederum mit dem zweiten Elektron auf die Weise wechselwirkt, sodass eine Anziehung zwischen den beiden besteht, die bei sehr niedrigen Temperaturen die Abstoßung aufgrund der Coulombkraft zwischen den Elektronen überwinden kann. Der Spin der beiden muss dabei gleich groß und entgegengerichtet sein, sodass das ganze Cooper-Paar über einen Gesamtspin von null verfügt. Ein solches Cooper-Paar verhält sich nun wie ein einzelnes Teilchen mit einem (ganzzahligen) Gesamtspin von null. (Tipler & Mosca, 2008, S. 1307)

Eine Möglichkeit, Materie entsprechend ihrer Eigenschaften in zwei verschiedene Arten von Teilchen einzuteilen, ist die Unterscheidung von Fermionen und Bosonen. Fermionen sind im Allgemeinen die Teilchen, aus denen unsere Materie aufgebaut ist, sie verfügen über einen halbzahligen Spin. Zu ihnen zählen beispielsweise die Bausteine der Atome wie Protonen und Neutronen, die streng genommen keine Elementarteilchen sind, sondern wiederum aus Quarks, die ebenfalls Fermionen sind, zusammengesetzt sind. Ebenso zählen wir zu den Fermionen die Elektronen, die wir als echte

Elementarteilchen als Vertreter der Klasse der Leptonen ansehen. Die zweite Art von Teilchen sind die Bosonen, sie verfügen über einen ganzzahligen Spin und vermitteln gemäß dem Standardmodell der Teilchenphysik die Kräfte zwischen Fermionen. Ein Beispiel hierfür ist das Photon, es überträgt die elektromagnetische Wechselwirkung und damit auch das für uns sichtbare Licht. Der Spin ist der Eigendrehimpuls eines Teilchens, er wird im Fall von Fermionen in Form von halbzahligen und bei Bosonen ganzzahligen Vielfachen des reduzierten Planck'schen Wirkungsquantums  $\hbar$  angegeben. Die Besetzung von Quantenzuständen erfolgt bei Fermionen nach der Fermi-Dirac-Verteilung:

$$f_{BE}(E) = \frac{1}{A_{FD}e^{\frac{E}{kT}} + 1} \tag{6.1}$$

 $f_{BE}$  ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Besetzung von Quantenzuständen, abhängig von der Energie E,  $A_{FD}$  ein Normierungsfaktor, der von der Temperatur abhängig ist, k die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur.

Da der Normierungsfaktor  $A_{FD}$  der Fermi-Dirac-Verteilung von der Temperatur stark und annähernd exponentiell abhängig ist, kann er auch wie folgt ausgedrückt werden:

$$A_{FD} = e^{-\frac{E_F}{kT}} \tag{6.2}$$

 $E_F$  wird als Fermi-Energie bezeichnet, sie ist nach dem italienischen Physiker und Nobelpreisträger Enrico Fermi (1901-1954) benannt und gibt die höchste Energie an, die ein System von Fermionen haben kann, wenn es sich in seinem Grundzustand befindet. Eingesetzt in die ursprüngliche Fermi-Dirac-Verteilung ergibt dies Folgendes:

$$f_{FD}(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \tag{6.3}$$

Ist die Energie höher als die Fermi-Energie wird der Exponent bei niedrigen Temperaturen groß und  $f_{FD}$  geht gegen null. Ist sie allerdings geringer, sieht die Sache völlig anders aus, da  $E-E_F$  negativ wird und der gesamte Ausdruck  $e^{\frac{E-E_F}{kT}}$  gegen null geht. Damit bleibt nur mehr die 1 im Nenner des Bruches übrig und  $f_{FD}$  ergibt schließlich 1. Dies bedeutet, dass jeder Quantenzustand nur von einem Teilchen besetzt werden kann. Dieses Prinzip entspricht auch dem Pauli-Verbot, so können beispielsweise zwei Elektronen innerhalb eines Atoms nicht denselben Satz an Quantenzahlen besitzen. Etwas anderes gilt allerdings für Bosonen, sie folgen der Bose-Einstein-Verteilung:

$$f_{BE}(E) = \frac{1}{A_{BE}e^{\frac{E}{kT}} - 1} \tag{6.4}$$

 $f_{BE}$  ist in diesem Fall die wiederum von der Energie E abhängige Besetzungswahrscheinlichkeit der Quantenzustände, k die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur. Der Normierungsfaktor  $A_{BE}$  ist

allerdings nur sehr schwach von der Temperatur abhängig, sodass beinahe ausschließlich der Term  $e^{\frac{E}{kT}}$  für die Temperaturabhängigkeit verantwortlich ist. Wenn man nun als Vereinfachung  $A_{BE}=1$  setzt, erhält man folgende Verteilung:

$$f_{BE}(E) = \frac{1}{e^{\overline{kT}} - 1} \tag{6.5}$$

Bei sehr kleinen Werten von T wird der gesamte Exponent  $e^{\frac{E}{kT}}$  groß, die gesamte Verteilungsfunktion geht bei hohen Energiezuständen gegen null. Bei niedrigen Temperaturen versuchen alle Teilchen gemeinsam, den niedrigsten Energiezustand einzunehmen, dieser Effekt ist auch bekannt unter dem Namen Bose-Einstein-Kondensation. (Krane, 2012, S. 306 f)

Elektronen sind grundsätzlich Fermionen, sie befolgen die Fermi-Dirac-Verteilung, verfügen über einen halbzahligen Spin und müssen sich dem Pauli-Verbot beugen. Gemäß der BCS-Theorie der Supraleitung bilden die Elektronen unterhalb der Sprungtemperatur T<sub>C</sub> Cooper-Paare, die über einen ganzzahligen Spin verfügen und daher als Bosonen behandelt werden können. Aus diesem Grund können mehrere dieser Cooper-Paare denselben Quantenzustand besetzen, sie sind nicht mehr durch die Fermi-Dirac-Verteilung und das Pauli-Verbot beschränkt. Die Teilchen innerhalb dieses gemeinsamen Grundzustandes verhalten sich nun vereinfacht gesagt wie ein einziges. Eine der Folgen davon ist die Möglichkeit, elektrischen Strom ohne Verluste über weite Strecken zu transportieren. (Krane, 2012, S. 348 f)

## 2.6.1 Der Meißner-Ochsenfeld-Effekt

Neben der Tatsache, dass supraleitende Materialien unterhalb ihrer Sprungtemperatur T<sub>C</sub> jeden messbaren elektrischen Widerstand verlieren, haben sie die Eigenschaft, äußere Magnetfelder aus ihrem Inneren vollständig zu verdrängen, für die magnetische Flussdichte im Inneren eines Supraleiters gilt B = 0. Interessanterweise ist das genau das gegenteilige Verhalten, dass man von einem idealen Leiter erwarten würde. Die Sprungtemperatur ist wiederum von der Stärke des Magnetfeldes abhängig, je höher diese ist, desto geringer wird T<sub>C</sub>, ein zu starkes Feld verhindert supraleitendes Verhalten. Eine Möglichkeit, sich den Meißner-Ochsenfeld-Effekt vorzustellen, ist die Annahme von zirkulierenden Strömen in einer dünnen Oberflächenschicht des Supraleiters. Aufgrund der Lenz'schen Regel wirken diese dem Magnetfeld entgegen und sorgen für die Abstoßung. Wegen der idealen Leitereigenschaft des Supraleiters erfolgt keine Abschwächung dieser Ströme, sie hindern das Magnetfeld dauerhaft daran, in das Innere einzudringen. Tatsächlich ist der Effekt in sehr dünnen Supraleitern nicht vollständig ausgeprägt. Durch die vollständige Verdrängung des Magnetfelds aus dem Inneren bilden Supraleiter ideale Diamagneten, sie bieten eine Möglichkeit, einen Körper durch

statische Magnetfelder levitieren zu lassen, ohne dabei das Earnshaw-Theorem zu verletzen. (Meschede, 2010, S. 920 ff)

## 2.6.2 Die magnetische Pille

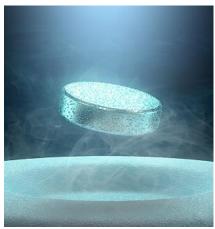


Abbildung 41: Eine Magnetpille schwebt über einem gekühlten Supraleiter; Bild: www.spektrum.de.



Abbildung 42: Scheibe aus supraleitendem Material; eigenes Bild.

Ein einfacher Versuch, mit dem wie auf Abbildung 41 zu sehen das diamagnetische Schweben mit Hilfe eines Supraleiters gezeigt werden kann, ist die sogenannte magnetische Pille. In Fall wird Supraleiter diesem ein unterhalb Sprungtemperatur abgekühlt und ein kleiner, starker Magnet über ihm platziert. Für unsere Experimentiervorlesung wurde wie auf Abbildung 42 zu sehen ein Supraleiter aus Yttrium-Barium-Kupferoxid verwendet bei dem es sich um Hochtemperatursupraleiter handelt. Daher ist es einfach möglich, ihn mit flüssigem Stickstoff zu kühlen. Solange sich die Temperatur des Supraleiters unter seiner Sprungtemperatur befindet, schwebt der kleine Magnet über ihm, da der Supraleiter aufgrund seines idealen Diamagnetismus diesen abstößt.

#### 2.6.3 Das Möbiusband



Abbildung 43: Magnetbahn für einen Supraleiter in Form eines Möbiusbands; Bild: Florian Kappe.

Mithilfe des Phänomens der Supraleitung lassen sich noch weitaus spektakulärere Experimente zeigen, als das stabile Schweben eines Magneten. Im Rahmen unserer Experimentiervorlesung ließen wir einen kleinen Supraleiter über eine Magnetbahn in Form eines Möbiusbands ähnlich dem auf Abbildung 43 schweben. Ein solches entsteht, wenn man einen Streifen eines Materials einmal verdreht und seine Enden dann zusammenfügt. Das dadurch entstehende Band verfügt nur über eine Seite und eine Kante, eine Unterscheidung zwischen Ober- und Unterseite oder auch Innenund Außenseite ist nicht möglich.

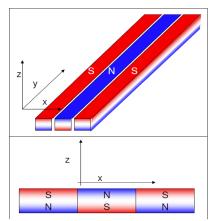


Abbildung 44: Orientierung der Nordund Südpole auf der Magnetbahn; Darstellung: Strehlow & Sullivan.

Auch in unserer Demonstrationsvorlesung wurde ein Magnetband, wobei die Ausrichtung der Pole jener auf Abbildung 44 entspricht, verwendet. Der Supraleiter muss zunächst genau auf das über der Bahn bestehende Magnetfeld konfiguriert werden. Dazu befestigt man ihn genau an gewünschter Position und Höhe über der Magnetbahn und kühlt ihn unter die Sprungtemperatur ab. Dadurch ist er genau auf die Magnetfeldkonfiguration eingestellt, gibt man ihm dann einen Schubser in Längsrichtung, gleitet er über dem Band einige Zeit dahin. Da die Abschirmungsströme im Supraleiter ohne Widerstand fließen, wird er nur durch den Luftwiderstand gebremst, aus diesem Grund saust er Runde um

Runde solange über die Bahn, bis er über seine Sprungtemperatur erwärmt wird. Nun wurde bereits erörtert, dass Supraleiter als ideale Diamagneten von Magnetfeldern grundsätzlich abgestoßen werden und es dadurch möglich ist, einen Zustand der Levitation zu erreichen. In unserem Fall schwebt er allerdings nicht nur über der Magnetbahn, er folgt ihrem Verlauf und bleibt sogar kopfüber unterhalb der Bahn in seiner Mittelposition. Wie ist das möglich?

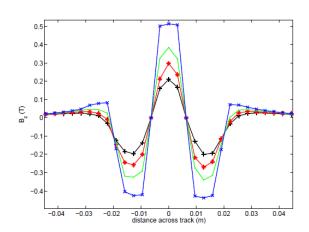


Abbildung 45: z-Komponente des Magnetfeldes über der x-Achse der Bahn in unterschiedlichen Höhen (Blau: 3,2 mm über der Bahn, grün 6,4 mm, rot 9,5 mm und schwarz 12,7 mm); Darstellung: Strehlow & Sullivan.

Verantwortlich dafür, dass der Magnet nicht nur von der Magnetbahn abgestoßen wird, ist die Anordnung der Magnete entlang der Bahn. Das Band besteht aus drei Reihen von Magneten, die parallel zueinander sind. Während die Pole der Magneten auf den äußeren Bahnen jeweils in dieselbe Richtung orientiert sind, sind die der mittleren umgekehrt dazu ausgerichtet. Aus diesem Grund entsteht wie auf Abbildung 45 zu sehen ein starker Gradient entlang der x-Achse, der den Supraleiter in der Mitte hält. Auch bei kleineren Auslenkungen entlang dieser Achse erfährt der

Supraleiter eine rückstellende Kraft Richtung Mitte der Bahn. Diese ist so stark, dass sie das Gewicht des Supraleiters tragen kann, während er verkehrt auf der Unterseite der Bahn dahingleitet, dadurch ist die Streckengestaltung in Form eines Möbiusbands möglich. Im Gegensatz zur x-Achse existiert entlang der y-Achse kein Gradient des Magnetfeldes und daher ist keine rückstellende Kraft vorhanden, eine Bewegung in dieser Richtung ist ungehindert möglich. (Strehlow & Sullivan, 2009)

## 2.7 Gasentladung

Blitze zählen zu den beeindruckendsten Naturerscheinungen, Leuchtstofflampen beleuchten unsere Räume und Straßen, Kathodenstrahlröhren lieferten Jahrzehnte lang bewegte Bilder in unsere Wohnzimmer. Was sie gemeinsam haben ist, dass sie auf dem Prinzip der Gasentladung beruhen. Schon seit dem 19. Jahrhundert macht man sich diese Technik zunutze, dies wurde durch erfolgreiche Entwicklungen sowohl im Bereich der Vakuum- als auch in der Hochspannungstechnik möglich. Das Prinzip klingt grundsätzlich einfach, man leitet elektrischen Strom durch ein Gas, dieses wird dabei angeregt und emittiert Licht. Allerdings benötigen Gase zur Leitfähigkeit bewegliche Ladungsträger, also lonen oder Elektronen. Um diese zu erhalten, muss den Gasteilchen die nötige lonisierungsenergie zugeführt werden. Auch elektrolytische Flüssigkeiten verfügen über lonen, da diese mit dem Lösungsmittel wechselwirken, können sie eine Solvathülle aus deren Molekülen aufbauen, die sie elektrisch stabilisiert. Im Gegensatz dazu sind ionisierte Gase nicht beständig, die lonisation muss aufrechterhalten werden, da die Teilchen ansonsten ständig mit entgegengesetzt geladenen rekombinieren. (Meschede, 2010, S. 481)

Bei den Entladungen wird zwischen selbständigen und unselbständigen entschieden, dies hängt davon ab, ob Ladungsträger von außen eingebracht werden ohne mit dem Ladungstransport selbst etwas zu tun zu haben. Unselbständige Entladungen sind, wie der Fall des Elektronenstrahls in Kapitel 2.7.2 teilweise auch im Hochvakuum möglich, wobei es sich streng genommen um keine Gasentladung handelt. Bei unselbständigen Gasentladungen ist die Energiequelle für die Ionisation grundsätzlich von der Spannungsquelle für den elektrischen Stromfluss verschieden, die Ionisierungsenergie kann in Form von Wärme oder hochenergetischer Strahlung erfolgen. Sobald durch Stoßionisation ständig neue Ladungsträger gebildet werden, spricht man von einer selbständigen Gasentladung. Beispiele hierfür sind Glimm-, Leuchtstoff- oder Hochdrucklampen. Für diese Stoßionisation müssen die Elektronen während ihrer Bewegung zwischen zwei Stößen mindestens die Energie aufnehmen, die wiederum ausreicht, um einem von ihnen gestoßenes Teilchen die notwendige Ionisierungsenergie zuzuführen. Da diese Weglänge von entscheidender Bedeutung ist, spielt neben der elektrischen Feldstärke, die für die Energieaufnahme der sich bewegenden Elektronen verantwortlich ist, die Anzahl der Teilchen pro Volumen, kurz gesagt der Druck, eine entscheidende Rolle. (Demtröder, 2012, S. 64)

Grundsätzlich stellt sich die Frage, warum Gasentladungen überhaupt leuchten. Wenn Elektronen mit Atomen zusammenstoßen, kann die übertragene Energie auch geringer als die notwendige Ionisierungsenergie des angestoßenen Atoms sein. In diesem Fall reicht die Energie zwar nicht aus um ein Elektron herauszuschlagen, sie kann allerdings groß genug sein, um ein Elektron auf einen höheren Energiezustand anzuregen. Ein Elektron in einem angeregten Zustand ist bestrebt diesen wieder in

Richtung eines niedrigeren Energieniveaus zu verlassen und gibt bei diesem Sprung ein Photon ab. (Demtröder, 2012, S. 66)

Photonen vereinigen die Eigenschaften von Wellen und Teilchen und anders als bei Wellen im Sinn der klassischen Mechanik hängt ihre Energie nicht von der Amplitude, sondern ihrer Frequenz ab. Im umgekehrten Sinn bedeutet dies, dass die Höhe der Energiedifferenz zwischen dem angeregten Zustand und dem Grundzustand eines Elektrons die Frequenz des Photons und damit im sichtbaren Bereich die Farbe bestimmt. Da die Energiezustände in Atomen diskret sind, was bedeutet, dass nur bestimmte Energieniveaus möglich sind, sind auch die Übergangsmöglichkeiten und damit die Frequenzen der emittierten Photonen begrenzt. Ein anschauliches Beispiel dafür ist das charakteristische gelbe Licht von Natriumdampflampen, die wir als nächtliche Straßenbeleuchtung kennen.

## 2.7.1 Geschichtete Gasentladung

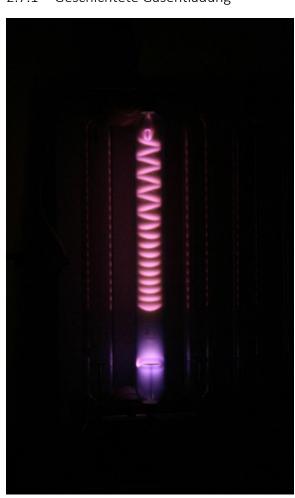


Abbildung 46: Geschichtete Gasentladung in einer Gasentladungsröhre; eigenes Bild.

Beim Experiment auf Abbildung 46 handelt es sich um eine Glimmentladung, diese setzen einen sehr niedrigen Druck im Bereich von 10<sup>-4</sup> bis 10<sup>-2</sup> bar voraus und funktionieren mit relativ geringen Stromstärken im Bereich von wenigen Milliampere. Der größte Spannungsabfall herrscht in einem kleinen Bereich vor der Kathode, in diesem werden die positiven Ionen stark beschleunigt. Durch den Aufprall entstehen Sekundärelektronen, wiederum solange beschleunigt werden, bis ihre Energie zur Anregung der Atome im Gas ausreicht. Dadurch entsteht nahe der Kathode das in Abbildung 46 unten gut erkennbare negative Glimmlicht. Entlang der nächsten Strecke, in unserem Fall aufwärts, erhalten die Elektronen die Menge an Energie, die zur Ionisation der Gasteilchen ausreicht, wodurch es zu einer hohen Konzentration von Elektron-Ionen-Paaren kommt. Da die Ionen wesentlich schwerer sind und dadurch eine höhere Trägheit besitzen als die Elektronen, sind sie auf ihrer Reise in Richtung der Kathode

langsamer als letztere auf ihrem entgegengesetzten Weg zur Anode. Aus diesem Grund entsteht an dieser Stelle ein positiver Ladungsüberschuss. Die in Abbildung 46 an ihrem rosafarbenen Leuchten gut erkennbare positive Säule füllt den größten Teil des Entladungsraumes aus, das elektrische Feld an dieser Stelle ist relativ konstant und gerade ausreichend stark, damit sich Ionisierungs- und Rekombinierungsrate die Waage halten. Da die Weglänge der geladenen Teilchen sowie die elektrische Feldstärke von entscheidender Bedeutung für die Ionisierungsrate ist, kann eine hier gut erkennbare Schichtung der positiven Säule durch eine Variation des Gasdruckes oder der angelegten Spannung erreicht werden. (Demtröder, 2012, S. 66 f)

## 2.7.2 Elektronenstrahl

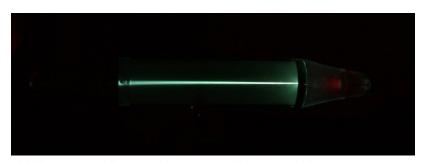


Abbildung 47: Geradlinige Ausbreitung eines Elektronenstrahls in einer Vakuumröhre; eigenes Bild.

Beim Experiment auf Abbildung 47 handelt es sich nicht um eine Gasentladung im engeren Sinn, da sich in der Röhre kein Gas, sondern ein Vakuum befindet. Zur Zeit der Entdeckung des Phänomens war noch nicht bekannt, dass es sich um einen

Strahl aus Elektronen handelt, daher wurde er auch Kathodenstrahl genannt, da er von einer Glühkathode emittiert wird. Noch heute wird der Elektronenstrahl im englischen "cathode ray" genannt, der Ausdruck CRT (cathode ray tube) für die mittlerweile aus unseren Wohnzimmern verschwundenen Röhrenfernseher geht ebenso darauf zurück. Genau genommen handelt es sich dabei um einen kleinen Linearbeschleuniger, in welchem Elektronen von einer Glühkathode ausgesendet und in Richtung der positiv geladenen Anode beschleunigt werden. Die Elektronen können dabei bis zu einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit und eine kinetische Energie von bis zu 30.000 eV erreichen. Die Ausbreitung verläuft grundsätzlich in gerader Linie in Richtung der Anode, der Strahl kann allerdings durch elektrische Felder in Querrichtung abgelenkt werden. Ein sehr anschauliches Beispiel für eine Anwendung dieser Technik ist das Oszilloskop. (Tipler & Mosca, 2008, S. 51)

### 2.7.3 Hörnerblitzableiter

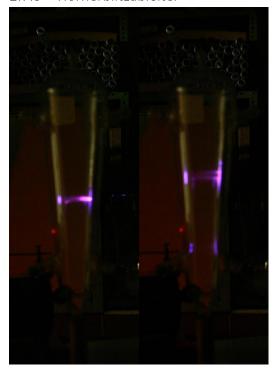


Abbildung 48: Hörnerblitzableiter oder Jakobsleiter auf dem linken Bild befindet sich der Funke auf dem Weg nach oben, auf dem rechten reißt der Funke oben ab während sich unten ein neuer bildet; eignes

Dieses Experiment ist gleichzeitig ein unabdingbares Accessoire zahlreicher Science-Fiction Filme der 1950er und 60er Jahre. Der auf Abbildung 48 zu sehende Hörnerblitzableiter ist auch als Jakobsleiter, im englischen "Jacob's ladder" bekannt. Dieser Name entstand in Anlehnung an die biblische Himmelsleiter, von der Jakob auf seiner Flucht vor seinem Bruder Esau geträumt hat (Genesis 28,12).

Der Versuch benötigt eine hohe Spannung im Bereich von 10 kV, die durch einen geeigneten Transformator erzeugt wird. Er besteht aus zwei Metallstäben, die so gebogen sind, dass sie sich an den unteren Enden beinahe berühren, während die oberen auseinanderlaufen. Wird nun eine hohe Spannung angelegt, springt an der Stelle, an der der Abstand der Stäbe am geringsten ist, ein Funke über. Vor allem

aufgrund thermischer Effekte durch die erwärmte Luft beginnt dieser nach oben zu steigen, bis er aufgrund der zu großen Entfernung zwischen den Stäben abreißt. Da die Potentialdifferenz weiterhin anliegt, entsteht in diesem Moment ein weiterer Funke, der wiederum nach oben steigt, der Vorgang wiederholt sich, solange eine Spannung angelegt ist. Der überspringende Funke ionisiert die Luft, dadurch wird sie leitend, durch angeregte Elektronen, die wieder in den Grundzustand zurückfallen, wird das Licht ausgesandt. (uni-goettingen.de)

### 2.8 Akustik

Dass Schallwellen eine Kraft auf Objekte ausüben können ist jedem bekannt, der sich einmal vor einen großen Basslautsprecher gestellt hat. Auch ist es möglich mit geeigneter Beschallung kleine Styroporkügelchen zum Hüpfen zu bringen. Diese Kraft kann so stark sein, dass sie Objekte schweben lässt, dies wird akustische Levitation genannt. Eine Möglichkeit dies zu erreichen ist das Schweben auf einer stehenden Welle. Schon 1866 wurde bei Versuchen mit der Kundt'schen Röhre beobachtet, dass sich kleine Staubteilchen in Richtung der Schwingungsknoten bewegen. 1933 gelang die Levitation eines kleinen Objekts in einer stehenden Welle zwischen Emitter und Reflektor. Bei dieser Bauweise muss zu deren Abstand eine richtige Wellenlänge gewählt werden, sodass sich eine stehende Welle ausbilden kann. Eine praktische Anwendung der akustischen Levitation mit stehenden Wellen, von der seit den 1980er Jahren Gebrauch gemacht wird, ist beispielsweise in der Mikrogravitation von Raumstationen Gegenstände für Untersuchungen festzuhalten. Im Jahr 2006 gelang es sogar kleine Tiere wie Ameisen, Marienkäfer und kleine Fische mittels stehenden Wellen levitieren zu lassen. Eine andere Methode Gegenstände mithilfe von Schallwellen schweben zu lassen wird "Squeeze film levitation" genannt. In diesem Fall wird ein Gegenstand mit flacher Oberfläche über dem Schallemitter platziert. Dabei kann der Abstand geringer als die Wellenlänge sein. 1975 gelang es, eine Messingscheibe mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Dicke von 0,5 mm über einer Schallquelle mit einer Frequenz von 20 kHz schweben zu lassen. Im Unterschied zur Levitation mit stehenden Wellen benötigt man keinen Reflektor, da der Gegenstand selbst die Wellenausbreitung blockiert. Zusätzlich muss der Abstand zwischen dem Emitter und dem zu levitierenden Objekt wesentlich kleiner sein als die Wellenlänge. Aus diesem Grund können sich in dem kleinen Spalt keine stehenden Wellen ausbilden. (Su & Wallaschek, 2011, S. 123 ff)

### 2.8.1 Akustische Levitation

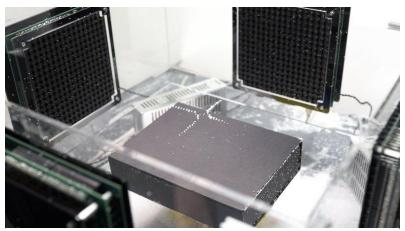


Abbildung 49: Kleine Kunststoffkugeln schweben in den Wellenknoten von vier aufeinander ausgerichteten Ultraschalllautsprechern; Bild: www.npr.org.

Die Methode der akustischen Levitation mit stehenden Wellen haben wir mithilfe eines Videos der Universität Tokio gezeigt, da der Versuchsaufbau recht aufwändig und empfindlich ist. Für die Aufnahme wurde wie auf Abbildung 49 zu sehen eine Anlage von vier Lautsprechern mit einer Frequenz von 40 kHz

verwendet. Diese sind so ausgerichtet, dass die von ihnen ausgesandten Ultraschallwellen genau im Mittelpunkt fokussieren. Durch gezielte Phasensteuerung sind Bewegungen der kleinen Kügelchen in die Höhe aber auch seitwärts möglich, sodass das Muster aus Teilchen, die in den Schwingungsknoten gehalten werden, dreidimensional bewegt werden kann. Auch wenn das Video in erster Linie ästhetisch ansprechend ist, liegt das Augenmerk der japanischen Forscher einerseits darauf, größere Objekte zu bewegen, andererseits der Möglichkeit Gegenstände unter dem Einfluss von Mikrogravitation im Weltall festhalten und bearbeiten zu können. (Chappell, 2014)

# 2.8.2 Ein Ultraschallzerstäuber schleudert Wassertropfen in die Höhe

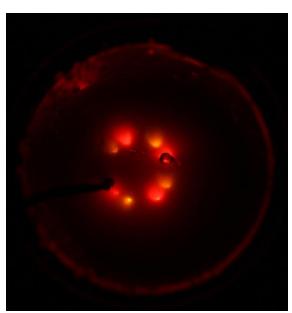


Abbildung 50: Von einem Ultraschallzerstäuber in die Höhe geworfene Wassertropfen; eigenes Bild.

Für das Experiment auf Abbildung 50 verwendeten wir einen handelsüblichen Ultraschallzerstäuber, wie er in zahlreichen Zimmerbrunnen und Raumbefeuchtern zu finden ist. Diese Zerstäuber sind so aufgebaut, dass mit piezokeramischen Elementen Schwingungen aufgebaut werden. Diese regen einen Zerstäuberboden an, der mit einem Flüssigkeitsfilm bedeckt ist. Der Boden versetzt den Flüssigkeitsfilm in Schwingung und es bilden sich an dessen Oberfläche Kapillarwellen, die sich mit Steigerung der Anregungsfrequenz exponentiell aufrichten bis einzelne Tropfen abgeschnürt werden. Die Oberflächenspannung der Flüssigkeit wirkt zwar als rückstellende Kraft, begünstigt aber

andererseits das Abschnüren der einzelnen Tropfen, sobald der Faden lange genug ist. Das schwingende System kann erheblich beschädigt werden, wenn es nicht vollständig mit Flüssigkeit bedeckt ist, daher ist immer darauf zu achten, dass eine ausreichende Menge an Flüssigkeit vorhanden ist, vor allem bei längerem Betrieb. (Wozniak, 2002)

In unserem Experiment legen wir einen Ultraschallzerstäuber in ein mit wenig Flüssigkeit gefülltes Messglas. Sobald man ihn an eine Stromquelle anschließt, beginnt er mithilfe von Ultraschallwellen, das Wasser zu vernebeln. Durch den oben beschriebenen Mechanismus werden auch Wassertropfen in die Höhe geschleudert.

### 2.9 Sonstiges und Zaubertricks

### 2.9.1 Hohlspiegel mit Frosch

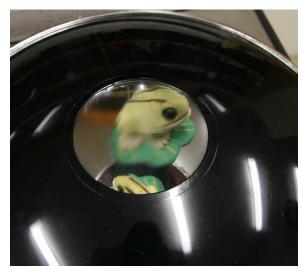


Abbildung 51: Der kleine Frosch scheint durch den optischen Trick über der Öffnung zu schweben; eigenes Bild.

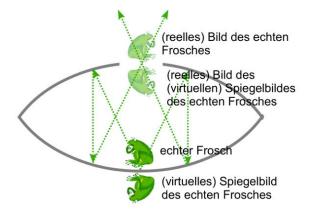


Abbildung 52: Strahlengang des "Zauberspiegels"; Quelle: http://www.physik.wissenstexte.de.

Dieser Zaubertrick auf Abbildung 1 besteht aus zwei aufeinandergesetzten parabolisch geformten Spiegeln, wobei der obere in der Mitte ein Loch hat. Die Besonderheit dieser Konstruktion liegt darin, dass sich der Brennpunkt eines Spiegels im Scheitelpunkt des jeweils anderen befindet. Wird in den Scheitelpunkt des unteren ein Gegenstand gesetzt, befindet sich dieser ebenso im Brennpunkt des gegenüberliegenden Spiegels. Im Brennpunkt des unteren Spiegels und damit gleichzeitig im Scheitelpunkt des oberen entsteht ein zwar reelles, aufrechtes aber seitenverkehrtes Strahlengang ist auf Abbildung 2 zu sehen. Aufgrund des Loches im oberen Spiegel erscheint das Bild in dieser Öffnung. Das dreidimensionale Bild entsteht, da auch der Gegenstand dreidimensional ist und nicht alle Punkte in einer Ebene liegen. Aus diesem Grund funktioniert der Trick nur bei kleinen Objekten, alle Punkte müssen sich mit hinreichender Genauigkeit gleichzeitig im Scheitelpunkt des unteren sowie dem Brennpunkt des oberen Spiegels befinden. Sieht man nun aus einem bestimmten Winkel auf die Öffnung, erscheint das dreidimensionale Bild beinahe real. (Salzmann, 2012)

#### 2.9.2 Lil' Suchtioner



Abbildung 51: Die Getränkedose wird nur durch den Luftdruck an der senkrechten Wand des Aquariums gehalten; eigenes Bild.

Faszinierend und praktisch zugleich ist der auf Abbildung 51 zu sehende Getränkehalter "Lil" Suctioner". Stülpt man den Schaumstoffring über eine Getränkedose und zieht den Ring vorsichtig bis an die Unterseite, kann man diese damit an jeder glatten Oberfläche befestigen. Damit ist es unter anderem möglich, eine Getränkedose am Tisch eines schwankenden

Segelbootes zu befestigen oder wie in Abbildung 51 an einer senkrechten Glaswand. Doch wie funktioniert der kleine Helfer? Wir sind, ohne es zu merken, ständig einem Luftdruck von ungefähr 1 bar ausgesetzt, der mittlere Druck der Atmosphäre beträgt auf Meereshöhe 101.325 Pa, das bedeutet 101.325 Nm<sup>-2</sup>. Dies entspricht der Kraft, die eine Masse von 10 Tonnen in Bodenhöhe durch die Erdbeschleunigung auf einen Quadratmeter ausübt, oder auch eine Masse von 1 kg auf einen Quadratzentimeter. Die Fläche des Ringes ist, vorausgesetzt dieser ist ausreichend dicht, sodass von außen keine Luft einströmen kann, jedenfalls ausreichend um eine Getränkedose aufgrund des Luftdrucks zu halten.

#### 2.9.3 Tischtennisball in Reis



Abbildung 52: Auf dem linken Bild sieht man in der rechten unteren Ecke des Gefäßes den Tischtennisball, auf dem rechten Bild liegt er nach wenigen Schüttelvorgängen an der Oberfläche; eigenes Bild.

Als bekanntes Phänomen bei Müslipackungen oder Studentenfutter gilt, dass größere Bestandteile wie beispielsweise Nüsse eher in den oberen Schichten zu finden sind. Dies liegt üblicherweise nicht an der der Abfüllung, die Hersteller achten üblicherweise darauf, die einzelnen dass Bestandteile gut durchgemischt Entmischung muss also während des Transports geschehen. Bei Müsli, Reis aber auch Sand handelt es sich um Granulate, darunter versteht man Feststoffe, die aber eine körnige oder

pulverförmige Struktur besitzen und die geschüttelt werden können. Granulate vereinigen Eigenschaften von Festkörpern und Flüssigkeiten, letzteres vor allem bei der Betrachtung im Kollektiv, wobei sich dennoch deutliche Unterschiede zeigen. So hängt die Ausströmungsgeschwindigkeit einer Flüssigkeit aus einem Loch vom hydrostatischen Druck, also der Höhe der Flüssigkeit über diesem ab, während bei einem Granulat die Geschwindigkeit, mit der es ausströmt, wie von der Sanduhr bekannt, von der Höhe unabhängig ist. Auch bilden Granulate Kegel, während sich Flüssigkeiten horizontal ausbreiten. Ein besonders interessanter Unterschied ist allerdings das Entmischungsverhalten und damit verbunden das Auftriebsverhalten von größeren Bestandteilen. Füllt man wie auf Abbildung 52 ein durchsichtiges Gefäß mit Reis, platziert darin einen Tischtennisball, drückt ihn nach unten und schüttelt das Gefäß, kommt der Ball schon nach wenigen Schüttelvorgängen wieder an die Oberfläche. Es gibt unterschiedliche Erklärungen für dieses Verhalten unter verschiedenen Bedingungen, in diesem Fall mit glatten Wänden geht man vom sogenannten Lückenmodell aus. Schüttelt man das Gefäß so schnell, dass die einzelnen Teilchen aufgrund ihrer Trägheit der Bewegung nicht folgen können, geraten sie in eine Situation mit stark herabgesetzter Schwerkraft. Dadurch werden die Reibungskräfte vermindert, welche die Anfangskonstellation stabilisiert haben. Aus diesem Grund reichen schon kleine Störungen aus um die gegeneinander verschobenen Teilchen in eine neue Anordnung zu bringen, diese stabilisiert sich wieder am Umkehrpunkt zwischen der Abwärts- und der Aufwärtsbewegung. Die Wahrscheinlichkeit, dass die kleineren Teilchen in die Lücken, die das größere hinterlässt, eindringen ist größer als der umgekehrte Fall. Ebenso ist es während des Fallvorgangs wahrscheinlicher, dass die kleinen Teilchen am großen vorbeiziehen, denn umgekehrt wird das größere von mehreren der kleinen Teilchen gebremst. Auf diese Weise nehmen die kleinen Teilchen in den Lücken der größeren mehr Platz ein, als ihnen diese bieten, die Lage, in der sich die großen Teilchen am Ende des Vorganges befindet, liegt leicht über der Ausgangslage. Beim nächsten Schüttelvorgang bildet diese Endlage den neuen Ausgangszustand und der gesamte Prozess wiederholt sich. (Schlichting, Nordmeier, & Jungmann, 1996, S. 191 ff)

#### 2.9.4 Schwimmende Münzen



Abbildung 53: Eine japanische 1 Yen-Münze wird von der Oberflächenspannung des Wassers gehalten; eigenes Bild.

Nach wie vor faszinierend ist das auf Abbildung 53 zu sehende Experiment mit einer Münze aus einem verhältnismäßig leichten Metall an der Wasseroberfläche. Der Versuch wird mit Münzen, die hauptsächlich aus Aluminium bestehen wie unseren alten 10 Groschen oder der in Abbildung 53 gezeigten 1 Yen-Münze durchgeführt, allerdings beträgt die Dichte von Aluminium mehr als das doppelte jener des Wassers. Aus diesem Grund kann sich also nicht um ein "Schwimmen" im Sinne des

Archimedischen Prinzips handeln. Eine andere Kraft muss also dafür verantwortlich sein, dass die Münze an der Oberfläche bleibt.

Die Kraft, die auf ein einzelnes Molekül im Inneren einer Flüssigkeit von allen Molekülen in seiner unmittelbaren Umgebung wirkt, ist im Mittel gleich null. Aus diesem Grund sind die Teilchen untereinander frei verschiebbar. Für Moleküle an der Oberfläche ist dies nicht mehr der Fall, sie werden nur von den in einer Halbkugel um sie befindlichen Nachbarmolekülen angezogen. Gegen diese Kraft muss Arbeit geleistet werden, aus diesem Grund ist die Energie eines Moleküls an der Oberfläche größer als die eines Teilchens im Inneren der Flüssigkeit. Um die Oberfläche einer Flüssigkeit zu erhöhen, muss eine Energie aufgewendet werden, mit der die Moleküle aus dem Inneren zur Flüssigkeitsoberfläche gebracht werden. Diese wird als spezifische Oberflächenenergie bezeichnet, die tangential zur Oberfläche auftretende Zugspannung als Oberflächenspannung. Solange die Gewichtskraft eines Objekts nicht ausreicht um diese zu überwinden, bleibt es trotz höherer Dichte an der Oberfläche. (Demtröder, Experimentalphysik 1 Mechanik und Wärme 6. Auflage, 2012, S. 167 f)

#### 2.9.5 Der Geysir



Abbildung 54: Unser Modellgeysir bricht im Hörsaal aus; eigenes Bild.

Dieser spektakuläre Versuch zeigt die Wirkungsweise eines Geysirs, wie auf Abbildung 54 zu sehen ist, anschaulich im Hörsaal. Unter Geysiren verstehen wir Quellen, die Fontänen heißen Wassers ausstoßen, in manchen Fällen sogar mit erstaunlicher Regelmäßigkeit. Der Aufbau besteht aus einem geschlossenen Metallbehälter, über dem ein etwa 2 Meter langes dünnes Rohr montiert ist, dessen oberes Ende in der Unterseite einer quadratischen Metallwanne endet. Das am unteren Ende des Rohres befindliche Gefäß wird mithilfe einer elektrisch betriebenen Kochplatte erhitzt, nach ungefähr einer halben Stunde bricht der Geysir das erste Mal aus. Nachdem der Ausbruch beendet ist, dauert es nur wenige Minuten bis zum nächsten, die Eruptionen wiederholen sich im Abstand von knapp fünf Minuten.

Wie bereits in Kapitel 2.9.4 beschrieben, herrscht an der Oberfläche von Flüssigkeiten eine zu dieser parallel ausgerichtete Zugspannung. Beim Phasenübergang vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand, dem Verdunsten, treten die Moleküle mit der höchsten Energie gegenüber der Oberflächenspannung aus und diffundieren von der Oberfläche. Ein Gleichgewicht tritt dann ein, wenn die Zahl der austretenden Moleküle gleich der in die Flüssigkeit eintretenden ist. Da bei einem offenen Gefäß

dieses Gleichgewicht aufgrund des praktisch unendlichen Gasvolumens nie eintreten kann, verdunsten Flüssigkeiten in offenen Gefäßen immer vollständig, unabhängig von Temperatur und Druck. Diese Form der langsamen Verdampfung durch die Oberfläche wird Verdunstung genannt. Ist die Wärmezufuhr ausreichend stark, sodass die Verdampfung an der Oberfläche nicht mehr ausreicht, um einen stationären Zustand zu erzielen, steigt die Temperatur solange an, bis sich im Inneren der Flüssigkeit selbst Blasen bilden. Mit weiterer Wärmezufuhr wird anstatt der Temperatur die Dichte jener Gasblasen erhöht. Ist der Sättigungsdruck in diesen gleich dem Druck, der auf der Flüssigkeit lastet, ist wieder ein Zustand konstanter Temperatur erreicht. Diese Verdampfung, die aus dem Inneren einer Flüssigkeit passiert, bezeichnet man als Sieden. Aufgrund dieses Zusammenhangs ist die Siedetemperatur abhängig vom Druck. Aus diesem Grund siedet Wasser auch schneller im Gebirge als

auf Meereshöhe. So wie in unserem Model, ist das Wasser dort wo es erhitzt wird, dem Druck der darüber befindlichen Wassersäule ausgesetzt. Beginnt das Wasser an dieser Stelle zu sieden, steigen kleine Dampfbläschen auf. Diese vermindern den Druck in der Wassersäule, wodurch ein explosionsartiges Sieden im unteren Bereich eintritt. Durch den Übergang des Wassers von der flüssigen in die gasförmige Phase vergrößert sich schlagartig das Volumen, wodurch, begleitet von einer heftigen Dampfentwicklung, die Wassersäule ausgeworfen wird. Fließt danach Wasser wieder in die Öffnung zurück, wiederholt sich der Vorgang. (Gross & Marx, 1999, S. 410 ff)

## 3 Literaturverzeichnis

- Barke, H.-D., Harsch, G., Marohn, A., & Krees, S. (2014). *Chemiedidaktik kompakt*. Münster: SpringerSpektrum.
- Baumeister, J., & Quitter, D. *Konstruktionspraxis*. Abgerufen am 13. 06 2017 von http://www.konstruktionspraxis.vogel.de: http://www.konstruktionspraxis.vogel.de/daspotential-von-aluminiumschaum-und-seine-anwendung-a-114123/
- Berry, M., & Geim, A. (04. 06 1997). Of flying frogs and levitrons. European Journal of Physics, 18.
- Bronstein, I., Semendjajew, K., Musiol, G., & Mühlig, H. (2012). *Taschenbuch der Mathematik*. Frankfurt am Main: Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch GmbH.
- Burger, W. (1988). Cartesianische Taucher. Bild der Wissenschaft(9).
- Chappell, B. (02. 01 2014). Using Sound To Levitate Objects And Move Them Midair. *the two-way*. Abgerufen am 23. 07 2017 von http://www.npr.org/sections/thetwo-way/2014/01/02/259148381/using-sound-to-levitate-objects-and-move-them-in-mid-air
- chemie.de. Abgerufen am 12. 06 2017 von www.chemie.de: http://www.chemie.de/lexikon/Schwefelhexafluorid.html
- Demtröder, W. (2010). *Experimentalphysik 3 Atome, Moleküle und Festkörper, 4. Auflage.* Kaiserslautern: Springer.
- Demtröder, W. (2012). *Experimentalphysik 1 Mechanik und Wärme 6. Auflage.* Kaiserslautern: Springer Spektrum.
- Demtröder, W. (2012). *Experimentalphysik 2 Elektrizität und Optik, 6. Auflage.* Kaiserslautern: Springer Spektrum.
- Earnshaw, S. (1842). On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 7*.
- Feynman, R. (2013). Sie belieben wohl zu scherzen, Mr. Feynman! Abenteuer eines neugierigen *Physikers.* München: Piper München Zürich.
- Giancoli, D. C. (2010). Physik. München: Pearson Deutschland GmbH.
- Gibbs, P., & Geim, A. (08. 03 1997). *Radboud University*. Abgerufen am 19. 06 2017 von http://www.ru.nl: http://www.ru.nl/hfml/research/levitation/diamagnetic/levitation-possible/
- Gross, R., & Marx, A. (1999). Physik I Mechanik, Akustik, Wärme. *Vorlesungsskript zur Vorlesung im WS 1999/2000*. Technische Universität München.
- Jewett, J. (1994). *Physics Begins with an M... Mysteries, Magic and Myth.* Needham Heights, Massachusetts: Prentice Hall.
- Jürß, U., & Rudolph, W. (7-8 2008). Völlig schwerelos! Magnet-Schweberegler mit dem ATM18. *elektor*.
- Kircher, E., Girwidz, R., & Häußler, P. (2007). *Physikdidaktik.* (P. Häußler, Hrsg.) Würzburg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Klußmann, N., & Nalik, A. (2004). Lexikon der Luftfahrt. Düsseldorf: Springer.

- Krane, K. (2012). Modern Physics Third Edition. Corvallis, Oregon: John Wiley & sons, Inc.
- Lewis, S. (21. 05 2014). The Deliberate Amateur. *Slate*. Abgerufen am 19. 06 2017 von http://www.slate.com/articles/business/how\_failure\_breeds\_success/2014/05/nobel\_prize\_in\_physics\_andre\_geim\_went\_from\_levitating\_frogs\_to\_science.html
- Lieberei, R., & Reisdorff, C. (2012). Nutzpflanzen. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG.
- Llorente, S., Monterde, F., Burdío, J., & Acero, J. (2002). A comparative study of resonant inverter topologies used in induction cookers. *APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE, Volume: 2.*
- MA 36. (2016). *Informationsblatt der MA 36.* Von https://www.wien.gv.at: https://www.wien.gv.at/wirtschaft/gewerbe/technik/pdf/himmelslaterne.pdf abgerufen
- March, R. (1997). An Introduction to Quadrupole Ion Trap Mass Spectrometry. *Journal of Mass Spectrometry*(32).
- Meschede, D. (2010). Gehrtsen Physik. Bonn: Springer Heidelberg Dordrecht London New York.
- Muir, H. (15. 06 2008). Science of Mentos-Diet Coke Explosions Explained. *ABC News*. Abgerufen am 26. 06 2017 von http://abcnews.go.com/Technology/science-mentos-diet-coke-explosions-explained/story?id=5069276
- Otten, E. W. (1998). Repetitorium Experimentalphysik. Mainz: Springer.
- Salzmann, W. (2012). Wissenstexte Physik-Wissen. Abgerufen am 27. 06 2017 von http://www.physik.wissenstexte.de: http://www.physik.wissenstexte.de/mirage.htm
- Scharlau, B., Nordmeier, V., & Schlichting, H. (2003). Magnetische Levitation. (D. P. Gesellschaft, Hrsg.) *Didaktik der Physik*.
- Schlichting, H., Nordmeier, V., & Jungmann, D. (1996). Die Großen landen immer oben Entmischen durch Mischen. *Physik in der Schule, 34/5*.
- Spektrum.de. Abgerufen am 05. 06 2017 von spektrum.de: http://www.spektrum.de/quiz/derenglische-physiker-und-chemiker-michael-faraday-1791-1867-erfand-nicht-nur-das-dynamo-prinzip-so/580329
- Strehlow, C., & Sullivan, M. (09 2009). A classroom demonstration of levitation and suspension of a superconductor over a magnetic track. *American Journal of Physics*.
- Su, Z., & Wallaschek, J. (2011). A standing wave acoustic levitation system for large planar objects. *Archive of Applied Mechanics, 2*.
- Tesch, M., & Duit, R. (2002). Zur Rolle des Experiments im Physikanfangsunterricht. *Didaktik der Physik Frühjahrstagung Leipzig 2002*. Kiel.
- Tipler, P., & Mosca, G. (2008). *Physics for Scientists and Engineers.* New York: W.H. Freeman Company.
- Tricker, R. (1974). *Faraday und Maxwell*. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft m.h.H.
- Ucke, C., & Schlichting, H.-J. (1994). Das Galilei-Thermometer Termometro Lento. (W. Wiley-VCH, Hrsg.) *Physik in unserer Zeit*(1).

uni-goettingen.de. Abgerufen am 22. 06 2017 von lp.uni-goettingen.de: https://lp.uni-goettingen.de/get/pdf/363

Wozniak, G. (2002). Zerstäubungstechnik. Chemnitz: Springer.

Zankl, H. (2006). Fälscher, Schwindler, Scharlatane Betrug in Forschung und Wissenschaft. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, KGaA.

# 4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auftriebskraft; eigene Darstellung	8
Abbildung 2: Cartesischer Taucher in einem verschlossenen Glaszylinder. Gut erkennbar ist die	
gewundene Austrittsöffnung um die Taille des Teufelchens; eigenes Bild	11
Abbildung 3:Unter dem kritischen Blick des Experimentators entschwebt der Ballon in Richtung der	ſ
Decke; eigenes Bild	12
Abbildung 4: Heißluftballons; Bild: Julia Scheiber	12
Abbildung 5: Kräftegleichgewicht bei festgebundenem Ballon; eigene Darstellung	13
Abbildung 6: Wir werden ein größeres Boot brauchen - Der Weiße Hai beim Testflug im	
Physikgebäude der TU-Graz; eigenes Bild	14
Abbildung 7: Luftballon in einem mit CO <sub>2</sub> befüllten Aquarium; eigenes Bild	16
Abbildung 8: Ein Aluschiffchen "schwimmt" in einem Aquarium mit Schwefelhexafluorid; eigenes Bild	17
Abbildung 9: Die mit Cola-light gefüllte Dose schwimmt, die Dose mit Cola sinkt aufgrund der	
höheren Dichte ab; eigenes Bild.	18
Abbildung 10: Die Hohlräume machen den Großteil des Volumens von Aluminiumschaum aus; eigenes Bild.	
Abbildung 11: Ein Stück Aluminiumschaum schwimmt an der Wasseroberfläche; eigenes Bild	
Abbildung 12: Eisenholz in einem mit Wasser gefüllten Glas; eigenes Bild	
Abbildung 13: Galilei-Thermometer; eigenes Bild.	
Abbildung 14: Density Paradox in der beliebten 1,8   Achtkantkaraffe von Luminarc; eigenes Bild	
Abbildung 15: Waage mit Bleigewicht und Styroporkugel in einer luftdichten Glocke; eigenes Bild	
Abbildung 16: Der Ball bleibt auch im Luftstrom, wenn die gesamte Vorrichtung seitwärts gekippt	- '
wird; eigenes Bild.	27
Abbildung 17: Mit etwas Fingerspitzengefühl ist es möglich, Schraubenzieher und Glühlampen in	۷,
einem Luftstrom schweben zu lassen; eigenes Bild	28
Abbildung 18: Tischtennisball schwebt in einem Wasserstrahl; eigenes Bild	
Abbildung 19: Dieser Durchflussmesser verwendet Kugeln mit unterschiedlichen Durchmessern;	20
eigenes Bild.	29
Abbildung 20: Cola-Fontäne nach der Auslösung des Mentos-Mechanismus; eigenes Bild	
Abbildung 21: Das Magnus-Geschoß auf seinem Flug durch den Hörsaal; eigenes Bild	
Abbildung 22: Schematische Darstellung des Stromlinienverlaufs bei einem Zylinder mit und ohne	71
Eigenrotation; Quelle: Demtröder, Experimentalphysik 1, Springer Spektrum, S 230	21
Abbildung 23: Kleine Magnete zeigen den Effekt der Diffusion in Gasen. Das obere Bild zeigt die	31
Ausgangslage vor dem Einschalten des Kompressors, beim Unteren sind die "Gasteilchen" bereits	
durchmischt; eigenes Bild.	ວາ
Abbildung 24: Der Ballon-Helikopter schraubt sich in Richtung der Hörsaaldecke; eigenes Bild	
Abbildung 25: Permanentmagnete schweben übereinander entlang einer zentralen Stange; eigenes	
Bild	
Abbildung 26: Die schwebende Magnetwalze bei Stillstand (oben) und in Rotation (unten); eigenes	
Bild.	3/
Abbildung 27: Das Levitron - der Kreisel schwebt aufgrund seiner Rotation über dem Magnetring;	20
eigenes Bild.	
Abbildung 28: Darstellung der magnetischen Feldlinien des Levitron; Bild: web.mit.edu.	эŏ
Abbildung 29: Ein Graphitplättchen schwebt stabil über Permanentmagneten; Quelle:	20
www.supermagnete.com.	
Abbildung 30: Ein lebender Frosch schwebt in einem starken Magnetfeld; Quelle: www.slate.com	40

Abbildung 31: Paul-Falle. Gut erkennbar sind die beiden Endkappenelektroden und die	
Ringelektrode; Bild: TU-Graz Dr. Lammegger	
Abbildung 32: Milchpulver in einer Linearfalle; eigenes Bild	46
Abbildung 33: Der Zauberstab mit eingebautem Van-de-Graaff-Generator lässt ein Gebilde a	
schweben; eigenes Bild.	
Abbildung 34: Schematische Darstellung eines van-de-Graaff-Generators; Quelle: Demtröder	
Experimentalphysik 2, Springer Spektrum, S 19.	
Abbildung 35: Magnetische Feldlinien um einen geraden Leiter, durch den ein Strom I fließt;	•
Darstellung.	
Abbildung 36: Alufolie schwebt kurzzeitig über einer Induktionskochplatte; eigenes Bild	
Abbildung 37: Versuchsanordnung zur schwebenden Spule über einer Aluminiumplatte - ma	
beachte den Warnhinweis rechts unten; eigenes Bild	
Abbildung 38: Aufbau des Elihu Thomson-Versuchs; eigenes Bild	51
Abbildung 39: Aktiv geregelte Elektromagnete halten den kleinen Globus in der Schwebe; eig	genes
Bild	51
Abbildung 40: die Flyte schwebt leuchtend über ihrer Plattform; Bild: www.flyte.se	52
Abbildung 41: Eine Magnetpille schwebt über einem gekühlten Supraleiter; Bild: www.spekti	um.de.
	56
Abbildung 42: Scheibe aus supraleitendem Material; eigenes Bild	56
Abbildung 43: Magnetbahn für einen Supraleiter in Form eines Möbiusbands; Bild: Florian Ka	ppe 56
Abbildung 44: Orientierung der Nord- und Südpole auf der Magnetbahn; Darstellung: Strehlc	w &
Sullivan	57
Abbildung 45: z-Komponente des Magnetfeldes über der x-Achse der Bahn in unterschiedlich	nen
Höhen (Blau: 3,2 mm über der Bahn, grün 6,4 mm, rot 9,5 mm und schwarz 12,7 mm); Darste	ellung:
Strehlow & Sullivan	57
Abbildung 46: Geschichtete Gasentladung in einer Gasentladungsröhre; eigenes Bild	59
Abbildung 47: Geradlinige Ausbreitung eines Elektronenstrahls in einer Vakuumröhre; eigene	es Bild.60
Abbildung 48: Hörnerblitzableiter oder Jakobsleiter - auf dem linken Bild befindet sich der Fu	nke auf
dem Weg nach oben, auf dem rechten reißt der Funke oben ab während sich unten ein neue	r bildet;
eignes Bild	61
Abbildung 49: Kleine Kunststoffkugeln schweben in den Wellenknoten von vier aufeinander	
ausgerichteten Ultraschalllautsprechern; Bild: www.npr.org	63
Abbildung 50: Von einem Ultraschallzerstäuber in die Höhe geworfene Wassertropfen; eigen	es Bild.
Abbildung 51: Der kleine Frosch scheint durch den optischen Trick über der Öffnung zu schw	
eigenes Bild	
Abbildung 52: Strahlengang des "Zauberspiegels"; Quelle: http://www.physik.wissenstexte.d	
Abbildung 53: Die Getränkedose wird nur durch den Luftdruck an der senkrechten Wand des	
Aquariums gehalten; eigenes Bild	
Abbildung 54: Auf dem linken Bild sieht man in der rechten unteren Ecke des Gefäßes den	
Tischtennisball, auf dem rechten Bild liegt er nach wenigen Schüttelvorgängen an der Oberfli	äche.
eigenes Bild.	
Abbildung 55: Eine japanische 1 Yen-Münze wird von der Oberflächenspannung des Wassers	
gehalten; eigenes Bild.	
Abbildung 56: Unser Modellgeysir bricht im Hörsaal aus; eigenes Bild	

# 5 Anhang

## 5.1 Auflistung der in der Weihnachtsvorlesung gezeigten Experimente

		Nr.:	Experiment Name:
1	Elektromagnetismus	1	Levi Apparatur
		2	Schwebende Erdkugel
		3	Flyte
		4	Alufolie auf Induktionsplatte
		5	Elihu Thomson
		6	Spule schwebt über Aluminium
2	Elektrostatik	7	Schweber - Elektrostatisch
		8	Paul-Falle
		9	Nesquikfalle
		10	Millikanversuch
3	Aerodynamik	11	Ball(on) im Luftstrom
		12	Der schwebende Schraubenzieher + Glühlampe
		13	Luftkissenfahrzeug/Keplerbahnen
		14	Luftkissenbahn/ideales Gas, Diffusion, Brownsche Bewegung, Resublimation
		15	Ball im Wasserstrahl
		16	Balloon Helicopter
		17	Aero Copter
		18	Magnus-Geschoß
		19	Zero Blaster
		20	Durchflussmesser
		21	Lil' Suctioner
4	Akustik	22	Akustische Levitation (Video)
		23	akustisch schweben
5	Magnetismus	24	2 Permanentmagnete - Schwebemagnete
		25	Diamagnetisches Schweben (+ Video mit Frosch)
		26	Levitron - Kreisel schwebt über Magneten
6	Supraleitung	27	Magnetische Pille
		28	Supraleitung (Möbiusband)

7 Archimedisches Prinzip	29	Cartesischer Taucher
	30	Heißluftballon
:	31	Der Hai - steuerbarer Heliumballon
:	32	Luftballon in Aquarium mit CO2
:	33	Alu-Boot in SF6
:	34	Wasserstoff- Ballon
:	35	Cola Light im Wasser
:	36	Poröser Al-Schaum
:	37	Eisenholz
:	38	Galilei-Thermometer
:	39	"Density-Paradox"
	40	Blei vs. Styropor in Luft und Vakuum
•	41	Tischtennisball in Reis
•	42	Schwimmende 10-Groschen / 1 Yen
8 Gasentladung	43	Plasmaball im Mikrowellenherd
•	44	Popcorn für Physiker
•	45	Geschichtete Gasentladung
	46	Elektronenstrahl
•	47	"Hörner-Funken" bzw. Hörnerblitzableiter
9 Sonstiges / Zaubertricks	48	Wasserschleuder
4	49	Wasserschleuder mit Schwamm
!	50	Hohlspiegel mit Frosch
!	51	Schwebender Mensch (mit Spiegel) + weitere
!	52	Schwebender Tisch ("Floating Table")
!	53	Kochlöffel
!	54	Seiltrick
!	55	Geysir
!	56	Cola und Mentos mit Ball
!	57	Weihnachtsmann - PET - Flasche