Experimente mit Dreh- und Kreisbewegungen

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines Magisters der Naturwissenschaften

an der Karl- Franzens- Universität Graz

vorgelegt von

Klaus Johannes MARATH

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

Graz, Februar 2020

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig 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.

Datum:	Unterschrift:
Batam.	Ontersenint.

Danksagung

Ich möchte mich bei meinen Eltern bedanken, die mir sowohl vor, als auch während meines Studiums immer beigestanden haben. Ohne eure finanzielle und moralische Unterstützung wäre mir ein Studium in dieser Form wohl nicht möglich gewesen. Deshalb widme ich euch diese Arbeit von Herzen und hoffe, dass sie euch beim Lesen Freude bereitet. Ebenfalls bedanke ich mich bei meiner Freundin Vicky. Für ihre Geduld, Hilfsbereitschaft und ihre aufmunternden Worte während des gesamten Studiums.

Außerdem möchte ich mich bei Herrn Prof. Pottlacher bedanken, ohne dessen hervorragende Betreuung und Hilfsbereitschaft, sei es bei den Experimenten selbst, sowie für die zur Verfügung gestellten Räumlichkeiten, diese Arbeit ebenfalls nicht zustande gekommen wäre. Danke für die insgesamt zur Verfügung gestellte Zeit und die Möglichkeit, eine Diplomarbeit mit Experimenten als Schwerpunkt zu verfassen.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit Demonstrations- und Freihandexperimenten zum Thema "Dreh- und Kreisbewegungen". Das Ziel der Arbeit ist es, den Aufbau, die Durchführung und die grundliegenden physikalischen Prozesse der einzelnen Experimente zu erfassen und darzustellen. Dabei war es von besonderem Interesse, möglichst viele Experimente zur Thematik in den einzelnen physikalischen Kategorien zu finden. Neben der Protokollierung und der Einteilung nach den physikalischen Kategorien wurden die insgesamt 47 Experimente mit einer Kamera fotografiert, gefilmt und auf einem eigenen YouTube – Kanal hochgeladen. Die dargestellten Bilder in der Arbeit und die hochgeladenen Videos haben die Intention, für eine bessere Nachvollziehbarkeit der Experimente zu sorgen.

Eine Grundidee der Arbeit war es, die Experimente für PädagogInnen und für den persönlichen Gebrauch in der Schule zur Verfügung zu stellen. Auf eine möglichst einfache und verständliche Darstellung der einzelnen Experimente wurde deshalb großen Wert gelegt, damit die Experimente ohne weitere Quellen gut nachzuvollziehen und in der Praxis leicht umzusetzen sind.

Abstract

This thesis deals with demonstration- and freehand experiments on the subject of "rotary- and circular movements". The objective of the work is to record and present the structure, implementation and basic physical processes of the individual experiments. It was of particular interest to find as many experiments as possible on the individual physical topics. In addition to logging and classification according to physical categories, the experiments were photographed and filmed with a camera and finally uploaded to an own YouTube - channel. The images shown in the work and the uploaded videos have the intention of making the experiments easier to understand.

A basic idea of the thesis was to make the experiments usable to educators and for personal usage at school. The focus here was on the simplest and most understandable representation of the individual experiments, so that the experiments are easy to understand without additional sources and that they are easy to implement in practice.

.

Inhaltsverzeichnis

1	Ei	nleitung1
2	M	echanik5
	2.1	Anemometer: selbstgebaut und digitales Messgerät5
	2.2	Ellipsograph des Archimedes
	2.3	Ermittlung der Geschwindigkeit eines Geschosses mithilfe zweier Papierscheiben9
	2.4	Experiment zur Drehimpulserhaltung: Drehstuhl und Gewichte
	2.5	Experimente zur Drehimpulserhaltung: Drehstuhl und Fahrradfelge
	2.6	Freie Drehachsen geometrischer Körper
	2.7	Funkenregen – Erklärung der Flugbahn von Funken anhand eines Winkelschleifers 18
	2.8	Keltischer Wackelstein
	2.9	Kräfteverteilung einer rotierenden Kugel in einem Cognacglas
	2.10	Magnuseffekt mit dem "Flying Gyroscope"
	2.11	Maxwell'sches Rad
	2.12	Mit einem Stück Papier Kreide durchschneiden
	2.13	Modellexperiment zur Abflachung der Erde
	2.14	Pfirsich in Sodawasser
	2.15	Plattenspieler mit Münzen
	2.16 "Sch	Veranschaulichung der Zentripetalkraft und Drehimpulserhaltung mit dem leudergerät"
	2.17 "Spi	Veranschaulichung der Zentripetalkraft und Drehimpulserhaltung mit einem nning Clown"
3	H	ydrostatik und Hydrodynamik45
	3.1	Cartesischer Taucher
	3.2	Flaschentornado
	3.3	Segner'sches Wasserrad
	3.4	Parabolische Oberflächenausbildung einer rotierenden Flüssigkeit51

	3.5	Wasserzähler	54
4	Ak	ustik / Schwingungen und Wellen	57
	4.1	Dopplereffekt mit einem Plastikrohr	57
	4.2	Erzeugung von Tönen mit einer Papierscheibe	60
	4.3	Hui Hui Rädchen	63
	4.4	Mit einem Joghurtbecher Musik hören	65
	4.5	Wilberforce Pendel	67
5	Wä	irmelehre	69
	5.1	Feuertornado	69
	5.2	Kerzenspiel als Konvektionsmotor	71
	5.3	Papierturbine	73
	5.4	Thermobile	75
	5.5	Wachsender Messingdraht	77
6	Ele	ektrizität und Magnetismus	79
	6.1	"Abschleppen" einer Dose mit einem Luftballon	79
	6.2	Arago'sche Scheibe	81
	6.3	Barlow'sches Rad	83
	6.4	Einfacher Gleichstrommotor.	85
	6.5	Elektrischer Wind	88
	6.6	Influenzmaschine	91
	6.7	Solarzelle	93
	6.8	Van de Graaff - Generator	96
	6.9	Drehstrommotor	98
	6.10	Wunderkreisel	101
7	Op	tik	103
	7.1	Farbkreisel	103
	7.2	Lichtmühle	105

	7.3	Messung der Lichtgeschwindigkeit mit der Drehspiegelmethode nach Foucalt	. 108
	7.4	Optische Täuschung: Benham – Scheibe	.110
	7.5	Stehende Bilder mit einem Farbkreisel und einem Stroboskop	.112
8	Ab	bildungsverzeichnis	114
9	Lit	eraturverzeichnis	118

1 Einleitung

Bereits zu meiner Schulzeit empfand ich den Einsatz von Experimenten im Physikunterricht als nicht nur sehr unterhaltsam, sondern auch für immens wichtig, eine Thematik, wenn möglich, mit einem Experiment zu veranschaulichen. Dabei muss meiner Meinung nach nicht immer die Überprüfung der bereits zuvor gelernten theoretischen Inhalte im Vordergrund stehen. Das Experiment an sich als Unterstützung zu den gelernten Inhalten kann bereits einen wertvollen Beitrag leisten. Auch in meinen bisherigen Schulpraktika hatte ich das Gefühl, dass der Einsatz von lehrerzentrierten Demonstrations- als auch Schülerexperimenten, einen Mehrwert für den Lernerfolg der SchülerInnen darstellte. Aufgrund dieser persönlichen Einschätzung war mir die Darstellung dieser Sammlung an Experimenten auch ein persönliches Anliegen. Natürlich sollten nicht nur persönliche Einschätzungen die Unterrichtsinhalte und Methoden einer Lehrkraft bestimmen, sondern vor allem auch der staatlich verordnete Lehrplan des Unterrichtsgegenstands die jeweiligen Elemente des Unterrichts mitbestimmen. Betrachtet man den allgemein didaktischen Grundteil des Lehrplans für das Unterrichtsfach Physik an allgemeinbildenden höheren Schulen, so unterstreichen besonders folgende Absätze die Bedeutung für den Einsatz physikalischer Experimente im Unterricht (wörtliche Zitierung):

"Lehrplan (Auswahl)

Bildungs- und Lehraufgabe:

Der Unterricht hat das Ziel, den Schülerinnen und Schülern das Modelldenken der Physik (Realwelt – Modell – Modelleigenschaften – Realwelt) zu vermitteln und physikalisches Wissen in größere Zusammenhänge zu stellen. Dies geschieht durch

 eigenständige und handlungsorientierte Auseinandersetzung mit Problemen aus dem Erfahrungsbereich der Schülerinnen und Schüler nach Möglichkeit ausgehend von Schülerexperimenten.

Beiträge zu den Bildungsbereichen:

Kreativität und Gestaltung: Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten; Einfluss der Physik auf Ästhetik, Funktion und Design.

Didaktische Grundsätze:

Bei der Gewinnung von Gesetzen ist neben der Verallgemeinerung von Beobachtungen auf Grund von Experimenten gelegentlich auch die gedankliche Herleitung und anschließende experimentelle Überprüfung von Lösungsansätzen (Hypothesen) anzuwenden.

Experimentieren und Erkenntnisgewinnung: In diesem Bereich erwerben Schülerinnen und Schüler Fähigkeiten und Fertigkeiten im Umgang mit physikalischen Arbeitsweisen. Schülerinnen und Schülern zeigen Kompetenzen dadurch, dass sie

- zu Vorgängen und Phänomenen in Natur, Alltag und Technik naturwissenschaftliche Fragen formulieren und Hypothesen aufstellen,
- zu Fragestellungen eine passende Untersuchung oder ein Experiment planen, durchführen und protokollieren,
- im Rahmen naturwissenschaftlicher Untersuchungen oder Experimente Daten aufnehmen und analysieren (ordnen, vergleichen, messen, Abhängigkeiten feststellen, Zuverlässigkeit einschätzen),
- Daten durch mathematische und physikalische Modelle abbilden und interpretieren." (Lehrplan zitiert nach: RIS: Lehrplan- Geltende Fassung, 2019)

Man sieht, dass das physikalische Experiment sowohl in der Bildungs- und Lehraufgabe, sowie in den allgemein didaktischen Grundsätzen Stellung findet. Die klassenspezifischen Inhalte sind im aktuellen Lehrplan sehr allgemein formuliert, wodurch auch hier keine Einschränkungen für den Einsatz von Experimenten zu finden sind.

Nach Manfred Bormann und Klaus Krämer kann die Physik nicht nur als eine Naturwissenschaft, sondern auch als eine Art Erfahrungswissenschaft eingestuft werden. Dem Experiment wird hier die Eigenschaft als wichtigste Quelle der physikalischen Erfahrung zugesprochen. Neben der bloßen Beobachtung von Phänomen zeichnet das Experiment die beliebige Wiederholbarkeit, sowie die Variabilität der gewählten Bedingungen aus. Das Experiment hat nicht nur die Möglichkeit, den SchülerInnen physikalische Sachverhalte zu vermitteln bzw. zu veranschaulichen oder Inhalte zu überprüfen, es zeichnet sich auch dadurch aus, eine Unterstützung in der sinn- und bedeutungsvollen Erfassung des Lerngegenstands zu liefern, sowie SchülerInnen mit der naturwissenschaftlichen Arbeitsweise vertraut zu machen. Auch die Funktion der Weckung und Förderung der Lernmotivation wird dem Experiment zugesprochen, die meiner Meinung nach als eine der wichtigsten Aufgaben des Experiments zählt. (vgl. Bormann M., Krämer K., 1982, S. 1ff.)

Nach Hartmut Wiesner, Horst Schecker und Martin Hopf werden Demonstrations-, wie auch Schülerexperimenten, vor allem der Aspekt der Unterstützung zugesprochen. Die Lehrkraft muss dementsprechend selbst anhand des festgelegten Ziels für den Unterricht entscheiden, welche Art von Experimenten am besten geeignet ist. Das Ziel des Unterrichts entscheidet also, welche Funktion das Experiment erfüllen muss. (vgl. Wiesner et al., 2017, S. 106f.)

Die Anpassbarkeit der Unterrichtsinhalte an die Lernenden kann meiner Meinung nach wohl als einer der größten Herausforderungen des Lehrberufs angesehen werden. Diese Herausforderung spielt auch bei der Auswahl der Experimente eine tragende Rolle. Jeder Lernende nimmt Experimente aufgrund des unterschiedlichen Vorwissens und der unterschiedlichen Erwartungen anders wahr. Deshalb ist eine genaue inhaltliche Vorbereitung der Lehrkraft, als auch eine genaue Erläuterung der Intention des Experiments an die SchülerInnen zu Beginn von Bedeutung. Vor der Durchführung des Experiments müssen die Lernenden das Experiment in die bisher gelernten Inhalte einordnen können. Das Experiment selbst darf und soll einen Überraschungseffekt liefern, jedoch nicht selbst für Überraschung sorgen. Außerdem ist eine detaillierte Nachbereitung essentiell, damit das Experiment lernwirksame Eigenschaften aufweisen kann. Fragen an den Ausgang, Beobachtung der SchülerInnen, sowie festgehaltene Erkenntnisse sollen in die Nachbereitung einfließen. Zusammengefasst kann der bewusste Einsatz des Experiments und die Anpassung an das jeweilige Unterrichtsziel und an die Lernenden als wichtigste Faktoren angesehen werden. (vgl. Wiesner et al., 2017, S. 111ff.)

Aufgrund der Wichtigkeit des Experiments im Unterricht habe ich mich dafür entschieden, eine praktische Arbeit zu physikalischen Experimenten verfassen zu wollen, die in der Schule eingesetzt werden können. Das Thema "Dreh- und Kreisbewegungen" wurde zusammen mit meinem Betreuer Herrn Prof. Pottlacher festgelegt. Entgegen der Vermutung bezogen auf den Titel der Diplomarbeit, dass ausschließlich Experimente der Mechanik zum Einsatz kommen werden, werden möglichst viele Experimente zu allen physikalischen Kategorien der Experimentalphysik vorgestellt. Die Darstellung der insgesamten 47 Experimente, die nach den physikalischen Kategorien der "Mechanik", "Hydrostatik und Hydrodynamik", " Akustik und Schwingungen und Wellen", "Wärme", "Elektrizität und Magnetismus", sowie "Optik" eingeteilt sind, beinhalten neben einer detaillierten Skizzierung des Versuchsaufbaus auch selbst aufgenommene Fotos, um das Experiment noch verständlicher zu machen. Die physikalische Erklärung liefert schließlich den physikalischen Hintergrund des einzelnen Experiments. Jedes Experiment beinhaltet verschiedene theoretische Kernaspekte, die unterschiedliches Vorwissen benötigen. Es wurde Wert darauf gelegt, theoretische Informationen so umfassend wie notwendig zu beschreiben, sodass das jeweilige Experiment auch ohne zusätzliche Literatur leicht nachzuvollziehen ist.

Neben der Protokollierung und Erklärung stand auch die visuelle Aufnahme der Experimente im Vordergrund der Diplomarbeit. Neben den aufgenommenen Fotos wurde deshalb jedes Experiment auch gefilmt und auf einem eigenen "YouTube – Kanal" hochgeladen. Die Videos

sollen die Nachvollziehbarkeit der einzelnen Experimente erhöhen, sowie zur Vereinfachung der Nachbildung der Experimente für PädagogInnen und andere interessierte Personen dienen. Jedes einzelne Experiment wurde mit einem Link und einem QR-Code, die zum Video führen, versehen, um es sowohl mit dem Computer als auch mit dem Smartphone schnell abrufen zu können.

2 Mechanik

2.1 Anemometer: selbstgebaut und digitales Messgerät

Material:

- 2 Tischtennisbälle
- Digitales Messgerät (Anemometer)
- Metallbefestigung
- Metalldraht
- Stativmaterial

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/ryXiZAvt-Tw

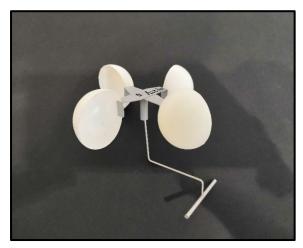


Abbildung 1: Selbstgebautes Anemometer; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz



Abbildung 2: Digitales Messgerät; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Für das selbstgebaute Anemometer benötigt man zwei Tischtennisbälle, die jeweils halbiert und entsprechend Abbildung 1 mithilfe einer Metallbefestigung (Kreuzform) verbunden werden. Ein geformter Metalldraht dient als Auflagepunkt für das frei drehbare Anemometer. Nun

befestigt man das Anemometer mit Stativmaterial und bläst in die Öffnung eines halbierten Tischtennisballs. Das Anemometer dreht sich abhängig von der "Stärke des Pustens" unterschiedlich schnell.

Für die zweite Variante des digitalen Messgerätes wurde das Anemometer mit Druckluft in hohe Geschwindigkeit versetzt (siehe Abbildung 2). Das digitale Messgerät liefert uns die Geschwindigkeit in der Einheit km/h.

Physikalische Erklärung:

Ein Anemometer ist ein Gerät, dass die Geschwindigkeit des Windes misst. (griech. "anemos" = "Wind"). Grundsätzlich werden aber alle Geräte, die die Strömungsgeschwindigkeiten von Gasen und Flüssigkeiten messen können, als Anemometer bezeichnet. In unserem Experiment wird mithilfe von halbierten Tischtennisbällen ein Anemometer gebastelt, welches unter die Kategorie der "Schalenanemometer" fällt. Auch das digitale Messgerät weist diese Schalenkonstruktion auf. Je nach der Stärke des Windes drehen sich die Schalen unterschiedlich schnell. Beim digitalen Messgerät misst ein Sensor die Umdrehungen der Schalen und schließt so auf die Strömungsgeschwindigkeit. (vgl. Wikipedia: Anemometer, kein Datum)

2.2 Ellipsograph des Archimedes

Material:

• Ellipsograph des Archimedes

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/An2-kkdP0z4



Abbildung 3: Ellipsograph aus Holz; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsaufbau:

Der "Ellipsograph des Archimedes" ist ein Gerät, welches die Form einer Ellipse bildet. Die Namensgebung nach Archimedes kann darauf zurückgeführt werden, dass der Mechanismus wohl bereits Archimedes bekannt war. Grundsätzlich besteht die Apparatur aus einer Platte mit zwei zueinander senkrecht stehenden länglichen Vertiefungen, in der sich zwei quaderförmige Holzplättchen befinden, die frei beweglich sind. Mit einem länglichen Stab auf den beiden Holzplättchen kann die Vorrichtung in Drehung versetzt werden. Während sich die Holzplättchen entlang der länglichen Vertiefung hin und her bewegen, formt das Ende des länglichen Stabes eine Ellipse.

Physikalische Erklärung:

Der Grund, weshalb die Vorrichtung die Form einer Ellipse darstellt, soll nun mathematisch beschrieben werden. Die Halbachsen a und b der Ellipse weisen Längen auf, die den Abständen vom Stabende zu jedem der beiden Drehpunkte entsprechen. Man bezeichne C als das äußere Ende der Stange und A sowie B als die Gelenke des Ellipsographen. p und q seien die Abstände zwischen A und B bzw. B und C. Ebenso nimmt man an, dass sich die Gelenke A und B entlang einer gedachten y- Koordinatenachse bewegen. Wenn der Stab nun mit der gedachten x-Achse einen Winkel θ bildet, sind die Koordinaten des Punktes C durch

$$x = (p+q)\cos\theta\tag{1}$$

$$y = q \sin \theta \tag{2}$$

gegeben. Wenn man für die große Halbachse a die Länge (p+q), sowie für die kleine Halbachse b die Länge q einsetzt, entsprechen die resultierenden Koordinaten der Gleichung für eine Ellipse in 1. Hauptlage:

$$\frac{x^2}{(p+q)^2} + \frac{y^2}{q^2} = 1 = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$$
 (3)

Somit entspricht die im Punkt C erzeugte Ellipsenform eine Ellipse in der 1. Hauptlage. (vgl. Wikipedia: Trammel of Archimedes, kein Datum.)

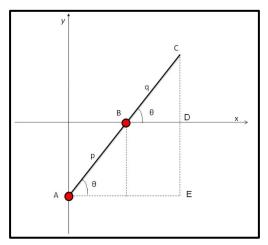


Abbildung 4: Mathematische Darstellung, Quelle:

https://en.wikipedia.org/wiki/Trammel_of_Ar chimedes

2.3 Ermittlung der Geschwindigkeit eines Geschosses mithilfe zweier Papierscheiben

Material:

- 2 Scheiben aus starkem Papier
- Dünner Stab
- Elektromotor
- Schere
- Metallstab
- Zirkel

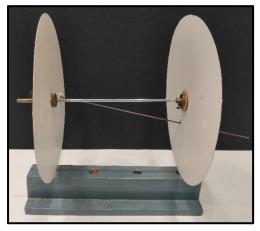


Abbildung 5: Versuchsaufbau: Zwei Papierscheiben (Seitenansicht); eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

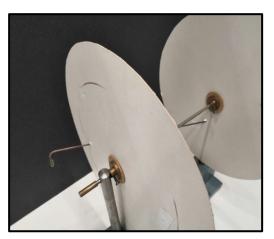


Abbildung 6: Versuchsaufbau: Metallstab als Winkelmesser; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Zunächst werden zwei kreisförmig ausgeschnittene Papierscheiben auf einem Metallstab mit waagrechter Drehachse befestigt, die mit einem Elektromotor verbunden ist. Die Drehzahl des Elektromotors muss für das Experiment bekannt sein. Nun wird auf die gleichmäßig rotierenden Scheiben ein Schuss mit einem Luftgewehr abgegeben. Mit einem dünnen Stab (z.B. aus Metall), der als Winkelmesser dient, werden nun die beiden Einschlagslöcher verbunden. Kennt man den Winkel α , den die beiden Einschusslöcher zueinander bilden (siehe Abbildung 6), den Abstand s zwischen den Scheiben sowie die Drehzahl n (Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde) dieser, kann daraus auf die Geschwindigkeit des Projektils geschlossen werden (siehe Physikalische Erklärung).

Physikalische Erklärung:

Das Projektil durchschlägt zunächst die erste Scheibe. Beim Durchschlagen der zweiten Scheibe hat sich diese durch den insgesamt längeren zurückgelegten Weg des Projektils schon ein kleines Stück weitergedreht. Der daraus resultierende gemessene Winkel zwischen den Einschusslöchern kann für die Berechnung der Geschwindigkeit der Geschosskugel herangezogen werden. Für eine Drehung um 360° benötigen die Scheiben die folgende Umlaufzeit T:

$$T = \frac{1}{n} \tag{4}$$

Die Zeit t, die die Kugel zwischen den Scheiben benötigt, ergibt sich mit dem gemessenen Winkel α zu:

$$t = T \frac{\alpha}{360^{\circ}} \to t = \frac{\alpha}{360^{\circ}} \frac{1}{n} \tag{5}$$

Mit $v = \frac{s}{t}$ kann nun die Geschwindigkeit der Kugel berechnet werden:

$$v = \frac{s}{\frac{\alpha - 1}{360^{\circ}n}} \rightarrow v = \frac{360^{\circ} \cdot n \cdot s}{\alpha}$$
 (6)

Es ist anzumerken, dass die Zeit des Projektils heutzutage auch leicht mit zwei Lichtschranken gemessen werden kann. So kann schlussendlich auch auf die Geschwindigkeit der Kugel geschlossen werden.

(vgl. Higatsberger, 1977, S.47f.; Leifiphysik: Geschwindigkeit einer Gewehrkugel, kein Datum)

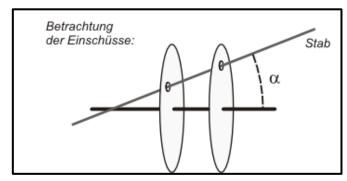


Abbildung 7: Skizze zum Versuchsaufbau; Quelle: https://lp.uni-goettingen.de/get/text/1806

2.4 Experiment zur Drehimpulserhaltung: Drehstuhl und Gewichte

Material:

- 2 Massestücke (je 5 kg)
- Drehstuhl

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/PjWPfVLqEK0



Abbildung 8: Ausgestreckte Arme: großes Trägheitsmoment/geringe Rotationsgeschwindigkeit; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Eine Person sitzt auf einem Drehstuhl und hält zwei gleich große Massestücke mit jeweils 5 kg in den Händen. Bei Rotation des Drehstuhls streckt die Person die Massestücke nun seitlich vom Körper weg, wobei eine Verringerung der Rotationsgeschwindigkeit beobachtet wird. Zieht man die Massestücke wieder zum Körper heran, erhöht sich die Rotationsgeschwindigkeit.

Physikalische Erklärung:

Dieses Experiment dient zur Veranschaulichung der Drehimpulserhaltung. Der Drehimpuls L, der in der Physik zur Beschreibung von Drehbewegungen dient, kann als Analogon für die Translationsbewegung beschreibende Zustandsgröße des Impulses $(p = m \cdot v)$, gesehen werden. Für einen Körper, der sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω um eine feste Drehachse dreht und das Trägheitsmoment I besitzt, gilt für den Drehimpuls:

$$L = I \cdot \omega. \tag{7}$$

Der Drehimpuls stellt einen Vektor dar, welcher parallel zur Winkelgeschwindigkeit ω verläuft. Aufgrund der festen Drehachse in diesem Experiment liegt der Drehimpuls aber in jedem Moment parallel zur Achse, weshalb nur der Betrag des Drehimpulses relevant ist. I stellt das Trägheitsmoment eines Körpers dar. Es dient ebenfalls der Beschreibung von Drehbewegungen und kann als Analogon zur Zustandsgröße der Masse gesehen werden: Das Trägheitsmoment ist abhängig von der Masse m, sowie dem Radius R eines Körpers:

$$I = m \cdot R^2. \tag{8}$$

Für den Erhaltungssatzes des Drehimpulses gilt: "Der Gesamtdrehimpuls eines rotierenden Körpers bleibt konstant, wenn das auf ihn wirkende äußere Nettodrehmoment null ist." (Giancoli, 2010, S. 344.)

Wenn die Person angenommen mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω rotiert und nun zwei Gewichtsstücke seitlich vom Körper wegstreckt, erhöht die Person damit das Trägheitsmoment I des Systems. Der Drehimpuls L bleibt somit nur erhalten, wenn sich die Winkelgeschwindigkeit um denselben Betrag verringert. Die Person rotiert also langsamer. Beim Heranziehen der beiden Gewichtsstücke zum Körper verringert sich das Trägheitsmoment des Systems. Die Winkelgeschwindigkeit erhöht sich und die Person rotiert somit schneller. (vgl. Giancoli, 2010, S.343f.)

2.5 Experimente zur Drehimpulserhaltung: Drehstuhl und Fahrradfelge

Material:

- Drehstuhl
- Fahrradfelge

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/Tlf5-7vGOGE



Abbildung 9: Rotierende Fahrradfelge mit horizontaler Drehachse - keine Rotation des Drehstuhls; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz



Abbildung 10: Rotierende Fahrradfelge mit vertikaler Drehachse – Rotation des Drehstuhls in entgegengesetzter Richtung; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Der Versuchsaufbau ähnelt dem Experiment 2.4 "Drehstuhlexperiment zur Erhaltung des Drehimpulses: Gewichte". Eine Person sitzt auf einem ruhenden Drehstuhl, hält aber anstatt zwei Gewichtsstücke nun eine rotierende Fahrradfelge mit horizontaler Drehachse vor sich.

Kippt man die Fahrradfelge, sodass die Felge eine vertikale Drehachse einnimmt, beginnt sich die Person auf dem Drehstuhl in die entgegengesetzte Richtung zu drehen.

Physikalische Erklärung:

Auch dieser Versuch dient zur Veranschaulichung der Drehimpulserhaltung. Betrachtet man die Ausgangsposition des Experiments, in der die Person auf dem Drehstuhl sitzt und eine Fahrradfelge mit horizontaler Drehachse in Drehung versetzt, ist der Gesamtdrehimpuls der vertikalen Drehrichtung, also die Richtung, in die sich der Drehstuhl drehen könnte, null. Es erfolgt keine Rotation des Systems, der Drehstuhl und die Person bleiben in Ruhe. Kippt man nun aber die Fahrradfelge um 90° nach rechts (vertikale Drehachse der Fahrradfelge) besitzt die Fahrradfelge nun eine Drehimpulskomponente in vertikaler Richtung: Der Gesamtdrehimpuls ist von null verschieden. Damit der Gesamtdrehimpuls im System erhalten bleibt, beginnt der Drehstuhl nun in die entgegengesetzte Richtung, gegen den Uhrzeigersinn, zu rotieren. Richtet man die Fahrradfelge nun wieder auf (horizontale Drehachse) und kippt man sie dann nach links, wird der Drehstuhl eine Rotation im Uhrzeigersinn vornehmen.

(vgl. Hilscher et al., 2004, S.179f.; LP - Uni Göttingen: Drehstuhlexperimente zur Erhaltung des Drehimpulses, kein Datum)

Zum besseren Verständnis das Experiment in mathematischer Schreibweise:

Ausgangsposition (Drehstuhl samt Person in Ruhe und rotierende Fahrradfelge mit horizontaler Drehachse):

$$L_{Fahrradfelge} + L_{Drehstuhl} = 0 (9)$$

→ Gesamtdrehimpuls erhalten.

Kippen der Fahrradfelge nach rechts (mit + gekennzeichnet), muss eine Rotation nach links bzw. gegen den Uhrzeigersinn (mit - gekennzeichnet) bedeuten:

$$+L_{Fahrradfelge} + (-L_{Drehstuhl}) = 0 (10)$$

→ Gesamtdrehimpuls erhalten.

Kippen der Fahrradfelge nach links (mit - gekennzeichnet), muss eine Rotation nach rechts bzw. im Uhrzeigersinn (mit + gekennzeichnet) bedeuten:

$$-L_{Fahrradfelge} + (+L_{Drehstuhl}) = 0 (11)$$

 $\rightarrow Ge samt drehimpuls\ erhalten.$

2.6 Freie Drehachsen geometrischer Körper

Material:

- Kette
- Ring aus Holz
- Scheibe aus Holz
- Schwungmaschine
- Seil
- Zylinderstab aus Holz

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/VGHOQnLSglQ



Abbildung 11: Zylindrischer Stab, Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau: eigenes Bild;



Abbildung 12: Versuchsaufbau: Scheibe, eigenes Bild; Apparatur: TU Graz



Abbildung 13: Versuchsaufbau: Ring eigenes Bild; Apparatur: TU Graz



Abbildung 14: Versuchsaufbau: Kette, eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Mithilfe eines Seils werden die unterschiedlichen geometrischen Körper bzw. Objekte (Zylinderstab, Scheibe, Ring und Kette) an eine Schwungmaschine befestigt (siehe Abbildungen 11-14). Nun werden die Körper der Reihe nach mit unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten in Drehung versetzt und die Ergebnisse festgehalten.

Physikalische Erklärung:

Zylinderstab aus Holz: Ein Körper weist bezüglich verschiedener Drehachsen verschiedene Trägheitsmomente auf. Bei geringer Drehzahl erkennt man beim Zylinderstab eine Drehung um die Längsachse, also der Achse des kleinsten Trägheitsmomentes, während bei höherer Drehzahl eine Rotation um die kleinste Drehachse, der Achse des größten Trägheitsmoments erfolgt.

Scheibe und Ring aus Holz: Bei beiden geometrischen Körpern erhält man dasselbe Ergebnis. Bei geringer Drehzahl rotieren beide Körper um die ursprüngliche Lage (kleinstes Trägheitsmoment). Bei Erhöhung der Drehzahl richten sich Scheibe und Ring auf und rotieren so um die Drehachse des größten Trägheitsmomentes.

<u>Geschlossene Kette:</u> Bei geringer Drehzahl kommt es auch hier zur Rotation um die Achse des kleinsten Trägheitsmoments, während bei hoher Drehzahl die Kette wie ein "Lasso" rotiert (Achse größten Trägheitsmomentes).

An allen vier geometrischen Körpern kann gezeigt werden, dass stabile Rotation um die Achse des größten Trägheitsmomentes stattfindet. Labile Rotation ist mit der Achse des kleinsten Trägheitsmomentes verknüpft.

(vgl. Higatsberger, 1977, S.121ff.)

2.7 Funkenregen – Erklärung der Flugbahn von Funken anhand eines Winkelschleifers

Material:

- Stück Metall
- Werkbank oder Stativmaterial, mit dem man das Stück Metall befestigen kann
- Winkelschleifer

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/MDtBESxn31M



Abbildung 15: Funkenregen; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

Ein Stück Metall wird mithilfe einer Werkbank (oder Stativmaterial) eingespannt. Nun nimmt man den Winkelschleifer und fährt damit gegen das Metallstück, sodass sich Metallpartikel vom Auflagepunkt lösen und dies anhand eines Funkenregens ersichtlich wird. Die Bahn dieser Metallpartikel bildet eine Tangente an den Kreisrand der Scheibe.

(Achtung: Bei diesem Experiment wird das Tragen einer Schutzbrille dringend empfohlen!)

Physikalische Erklärung:

Die Ausbildung einer Tangente der Funken an den Kreisrand der Scheibe ist mit dem Trägheitsgesetz zu erklären. Dieses besagt, dass "jeder Körper so lange im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen, geradlinigen Bewegung verharrt, wie keine Nettokraft auf ihn einwirkt.". (Giancoli, 2010, S. 107.) Der Begriff der Trägheit kann also als eine Tendenz eines Körpers verstanden werden, den Zustand der Ruhe bzw. der gleichförmigen Bewegung zu behalten. Die zu beobachtenden Funken bestehen aus feinsten Metallpartikeln vom Rand der Scheibe, die durch Kontakt mit dem Metallstab gelöst und bis zum Glühen erhitzt werden. Diese glühenden Metallpartikel sind auch in Form des orangen leuchtenden äußeren Randes der Scheibe sehr gut erkennbar (siehe Abbildung 15). Lösen sich nun diese Partikel wie beschrieben bei Kontakt mit dem Metallstab, verlassen sie die Kreisbahn der Trennscheibe und fliegen nach dem Trägheitsgesetz geradlinig weiter. Resultierend ist eine Tangente an der Kreisbahn der Scheibe. Ein genau gerader Strahl der Funken ist nicht zu beobachten, da der Auflagepunkt zwischen Winkelschleifer und Metallstab im Grunde genommen eine kleine Fläche und keinen Punkt darstellt. Deshalb bilden auch die Funken einen kleinen Winkel in ihrer Flugbahn. Auch die im unteren Bereich ersichtlichen einzelnen Funken, die sich nicht am Auflagepunkt zwischen Scheibe und Metallstück lösen, können für die Erläuterung der Flugbahn genutzt werden. An jedem Zeitpunkt des Verlassens der Metallpartikel bilden diese also eine Tangente an die Scheibe. (vgl. Hilscher et al., 2004, S.118f.)

2.8 Keltischer Wackelstein

Material:

Keltischer Wackelstein

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/iRdhhM3VhSE

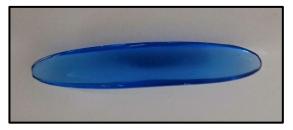


Abbildung 16: Keltischer Wackelstein: Perspektive von oben; eigenes Bild, Apparatur: TU Graz



Abbildung 17: Keltischer Wackelstein: seitliche Perspektive; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Der Keltische Wackelstein ist ein asymmetrisch geformter Körper. In diesem Experiment wurde ein Keltischer Wackelstein aus Kunststoff verwendet. Dreht man den Keltischen Wackelstein auf einer geraden Oberfläche (z.B. Tisch) in beide Richtungen, fällt sofort etwas Besonderes auf. Der Wackelstein rotiert in nur einer Richtung erwartungsgemäß gleichmäßig, bis er aufgrund der Reibung zwischen Oberfläche und Wackelstein zum Stillstand kommt. In der anderen Richtung rotiert der Wackelstein nicht gleichmäßig, sondern führt eine seinem Namen gerechte wackelige Bewegung aus, bis er dann plötzlich seine Rotationsrichtung umkehrt. Dieses nicht zu erwartende Verhalten soll nun physikalisch erklärt werden.

Physikalische Erklärung:

Entscheidend für den Keltischen Wackelstein ist seine nicht gleichmäßig geformte ellipsoidförmige Unterseite, sodass die Auflagepunkte an der Unterseite unterschiedlich mit der Oberfläche des Tisches abschließen, sowie eine asymmetrische Massenverteilung. Die wackelige Rotationsbewegung in eine Richtung kann in drei Abschnitte unterteilt werden: Zunächst in die wackelige Rotationsbewegung an sich, gefolgt vom Stillstand der Bewegung des Keltischen Wackelsteins und schließlich in die Umkehrung der Rotationsrichtung.

Abbildung 18 stellt die Achsen des Keltischen Wackelsteins dar, die für die Erklärung der Wackelbewegung und der Richtungsumkehr notwendig sind.

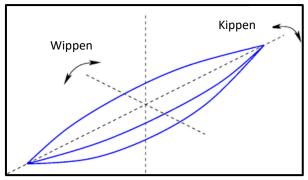


Abbildung 18: Darstellung der wippenden und rollenden Bewegung des Wackelsteins um seine Achsen; Quelle: https://www.wikiwand.com/en/Rattleback

Zunächst rotiert der Keltische Wackelstein und führt hauptsächlich eine wackelige bzw. wippende Bewegung um seine kurze Achse aus, was auch in Abbildung 18 dargestellt wird. In anderen Worten schwingt der Stein um seine kurze Achse. Ebenfalls bewegt er sich bzw. "kippt" ganz leicht um seine lange, horizontale Achse. Dies ist mit der bereits erwähnten ungleichmäßigen Form und der asymmetrischen Massenverteilung zu erklären. Durch die ständige Variation des Auflagepunkts wirkt ein veränderliches Drehmoment, wodurch die Wackelbewegung entsteht. Bevor der Keltische Wackelstein nun eine Änderung seiner Rotationsrichtung durchführt, bleibt er einen kurzen Moment stehen. Dies ist mit dem physikalischen Prinzip der Energieerhaltung zu erklären. Die anfängliche Energie (beim Andrehen des Wackelsteins) wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I_Z \cdot n^2 \tag{12}$$

 I_z stellt das Trägheitsmoment um die vertikale Achse und n die anfängliche Winkelgeschwindigkeit dar. Das Schwingen (Wackeln) um die kurze Achse benötigt nun Energie und ist durch:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I_X \cdot (wx)^2 \tag{13}$$

gegeben.

Hier stellt I_x das Trägheitsmoment um die kurze Achse dar. ω stellt die Kreisfrequenz ($\omega = 2\pi f$) und x die Amplitude in Radianten der wippenden Bewegung dar. Das Produkt der Parameter der Schwingungsenergie übersteigt die, der Anfangsenergie, weshalb die ursprüngliche Anfangsenergie vollständig in Schwingungsenergie umgewandelt wird und die Rotation des Wackelsteins gestoppt wird. Der letzte Schritt der Richtungsumkehr kann wie folgt erklärt werden: Der Wackelstein führt bevor die Richtungsumkehr stattfindet zwar keine Rotationsbewegung mehr aus, jedoch wippt er noch um seine kurze Achse. Abbildung 19 zeigt den Querschnitt des Wackelsteins während der Wackelbewegung:

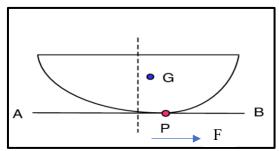


Abbildung 19: Querschnitt des Wackelsteins während Wackelbewegung; Quelle: https://www.researchgate.net/figure/Cross-section-of-a-96-mm-long-commercial-rattleback-at-A-B-where-it-is-thickest-and-also fig6 260905415

P kennzeichnet den Kontaktpunkt mit der Oberfläche, G stellt den Massenmittelpunkt des Wackelsteins dar, auf den die Gewichtskraft mg wirkt. Die Summe aus Gewichtskraft und der auf- und abwärtsbewegenden Wackelbewegung führt zu einer Kraft F nach rechts, womit eine Beschleunigung auf den Massenmittelpunkt resultiert und den keltischen Wackelstein veranlasst eine Rotationsbewegung in die Gegenrichtung auszuführen. Abbildung 20 verdeutlicht diese Richtungsumkehr aufgrund der resultierenden Kraft, indem der Keltische Wackelstein aus der Perspektive von oben gezeigt wird.

(vgl. Case/Jalal, 2014, S. 654ff.)

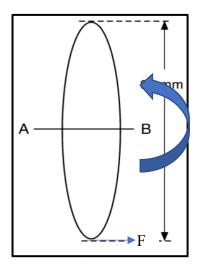


Abbildung 20: Resultierende
Kraft F und folgende
Richtungsumkehr des
Wackelsteins; Quelle:
https://www.researchgate.net/fig
ure/Cross-section-of-a-96-mmlong-commercial-rattleback-atA-B-where-it-is-thickest-andalso_fig6_260905415

2.9 Kräfteverteilung einer rotierenden Kugel in einem Cognacglas

Material:

- Cognacglas
- Kleine Kugel (oder Murmel, Ball)

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/LTtzkBoVEVM



Abbildung 21: Kugel im Cognacglas (Ausgangsstellung); eigenes Bild

Versuchsaufbau:

Für dieses Experiment benötigt man ein Glas, welches sich zu dessen Öffnung hin verengt (z.B.: Cognacglas). Dieses Cognacglas stellt man kopfüber auf eine kleine Kugel, damit sich diese im umgedrehten Glas befindet. Nun beginnt man das Glas kreisförmig in Bewegung zu versetzen, sodass sich die Kugel am Boden entlang der Wand des Glases bewegt. Erhöht man nun die Rotationsgeschwindigkeit des Glases, gewinnt die Kugel im Inneren des Glases an Höhe. Die

maximale Höhe befindet sich an der Stelle, an der das Glas den größten Radius aufweist. Ab einer bestimmten Rotationsgeschwindigkeit des Glases gelingt es dieses auch vom Boden anzuheben, ohne dabei die Kugel aus dem Glas fallen zu lassen.

Physikalische Erklärung:

Auf die Kugel wirken unterschiedliche Kräfte. Führt man eine Kreiselbewegung auf dem Tisch durch, rollt die Kugel aufgrund von Reibung zwischen Kugel und Glas entlang der Glaswand. Würde man sich nun vorstellen, dass keine Glaswand mehr existieren würde, würde die Kugel entlang einer Tangente an die Glaswand wegrollen. Die Kugel gewinnt jedoch an Höhe und rollt weiter im Inneren des Glases auf Kreisbahnen entlang. Dass die Kugel an der Glaswand entlangrollt, kann durch eine Zwangskraft erklärt werden, die von der Glaswand auf die Kugel ausgeübt wird und genau senkrecht zur Glaswand steht. Die Kreisbewegung entsteht aufgrund der horizontalen Komponente dieser Zwangskraft, der Zentripetalkraft, die nach innen gerichtet ist. Die vertikale Komponente der Zwangskraft gleicht die Gewichtskraft aus, die auf die Kugel wirkt und diese sonst veranlassen würde, aus dem Glas zu fallen. Ist die vertikale Kraftkomponente betragsmäßig gleich der Gewichtskraft, so entsteht eine stationäre Bahn. Übersteigt diese vertikale Kraftkomponente jedoch die Gewichtskraft, so kann die Kugel auch entlang der Glaswand nach oben wandern. Erreicht die Kugel die maximale Höhe, so weisen die Zentripetalkraft und die Zwangskraft, verursacht durch die Glaswand, einen gleich großen Wert auf und es existiert keine vertikale Kraftkomponente mehr.

(vgl. Hilscher et al., 2004, S.122f.)

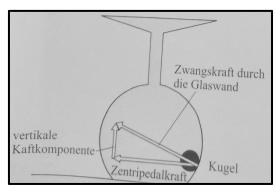


Abbildung 22: Skizze zur Kräfteverteilung, Quelle: Hilscher et al., 2004, S.122.

2.10 Magnuseffekt mit dem "Flying Gyroscope"

Material:

• Apparatur "Flying Gyroscope" inklusive Papierausschnitt

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/czgZTcaGcCQ



Abbildung 23: Spannen des Papierausschnittes; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

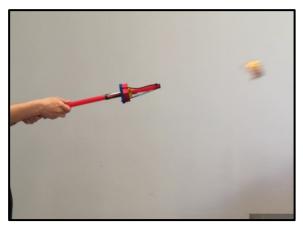


Abbildung 24: "Abschuss" des Papierausschnittes; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Das "Flying Gyroscope" besteht aus einer Plastikstange und einem hohl geformten kreisförmigen Papierausschnitt. Dieser Papierausschnitt kann über vier Gummibänder gespannt und wie eine Steinschleuder abgeschossen werden. Dreht sich das Papier in der Luft, weist es einen klar erkennbaren Drall auf und bewegt sich leicht nach oben, ehe es am Boden aufprallt. Dieses Phänomen wird als Magnuseffekt bezeichnet. Einen ähnlichen Effekt erlebt man beim Fußball oder Tennis, wenn man den Ball so tritt oder schlägt, dass dieser sich nicht gleichmäßig ohne Rotation nach vorne bewegt, sondern ein Drall des Balles entsteht und dies eine Ablenkung in der Flugbahn bewirkt.

Physikalische Erklärung:

Während sich der Papierausschnitt nach vorne bewegt, wird er von der Luft umströmt. Der Drall ist damit zu erklären, dass die umströmende Luft oben am Papierausschnitt eine höhere Strömungsgeschwindigkeit als unten aufweist. Abbildung 25 illustriert die nicht gleichmäßige Geschwindigkeit der umströmenden Luft an einem kreisförmigen Körper. Nach dem Gesetz von Bernoulli sind unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten mit unterschiedlichem Druck verbunden. Schnellere Strömungsgeschwindigkeiten weisen einen geringeren Druck auf, sodass in unserem Experiment der statische Luftdruck oberhalb des Papiers kleiner ist und es zur Ausbildung einer Querkraft auf den Papierausschnitt kommt. Diese Querkraft erklärt somit die nach oben gelenkte Flugbahn des Papiers, bis es aufgrund der Reibung gebremst wird und wieder langsam absinkt. (vgl. Demtröder, 2018, S.233f.; Hilscher et al., 2004, S.445f.)

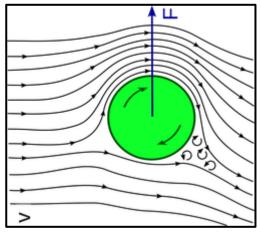


Abbildung 25: Illustrierung des Magnuseffekts: F stellt die Querkraft dar, die auf einen umströmten Körper wirkt; Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Magnus-Effekt

2.11 Maxwell'sches Rad

Material:

- Schnüre
- Stativmaterial
- Zylindrische Scheibe (Maxwell'sches Rad)

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/7bhzGu9G3vE



Abbildung 26: Versuchsaufbau; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Das Maxwell'sche Rad, benannt nach dem schottischen Physiker James Clerk Maxwell, besteht aus einer zylindrischen Scheibe mit der Möglichkeit, diese mittels Schnüren aufzuhängen (siehe Abbildung 26). Zwei Schnüre davon dienen dazu, dass die Scheibe frei drehbar in der Luft hängen kann, die dritte Schnur dient zum Auf- und Abwickeln der Scheibe bei Versuchsbeginn. Mittels Stativmaterial befestigt man die Vorrichtung. Wenn man die zylindrische Scheibe mit der Schnur aufwickelt und schließlich loslässt, verhält sich die Scheibe wie ein Jojo: Sie

vollführt eine rollende Ab- und Aufwärtsbewegung indem sie sich am unteren Umkehrpunkt wieder aufwickelt. Deshalb wird die Vorrichtung auch oft als "Maxwell'sches Jojo" bezeichnet.

Physikalische Erklärung:

Das Maxwell'sche Rad dient zur Veranschaulichung der Umwandlung von potentieller Energie in kinetische Translations- sowie Rotationsenergie und umgekehrt. Durch das größere Trägheitsmoment bzw. die größere Masse und der damit verbundenen gleichmäßigeren Bewegung, ist es gegenüber dem normalen Jojo für Demonstrationszwecke besser geeignet. Das Maxwell'sche Rad besitzt zu Beginn, wenn das Rad mit dem Faden aufgewickelt wurde, eine gewisse potentielle Energie. Lässt man es los, so wird es unter Einfluss des Drehmoments zu rotieren beginnen und sich beschleunigt nach unten bewegen. Dabei wandelt es potentielle Energie in kinetische Translations— und Rotationsenergie um. Am unteren Umkehrpunkt hat sich die gesamte potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt:

$$E_{POT} = mgh = E_{KIN} (14)$$

Die kinetische Energie setzt sich dabei aus einem Translation- und Rotationteil zusammen:

$$E_{KIN} = E_{TRANS} + E_{ROT} \tag{15}$$

$$E_{TRANS} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mr^2w^2 \tag{16}$$

$$E_{ROT} = \frac{1}{2}Iw^2 \tag{17}$$

Nun wickelt sich das Maxwellsche Rad am unteren Umkehrpunkt wieder fast bis zur Ausgangshöhe auf, die wegen Reibungsverlusten nicht ganz erreicht wird. Hierbei wird die kinetische Energie wieder in potentielle Energie umgewandelt. (vgl. Demtröder, 2018, S. 139.)

2.12 Mit einem Stück Papier Kreide durchschneiden

Material:

- Bohrmaschine
- Mutter und Beilagscheiben
- Metallstift
- Papier
- Schere
- Stück Kreide
- Zirkel

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/BtpJI6kC6oA



Abbildung 27: Angepasste Papierscheibe; eigenes Bild



Abbildung 28: Papier "sägt" Kreide durch; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

Mit einem Zirkel und einer Schere fertigt man eine kreisförmige Papierscheibe mit einem Durchmesser von rund 20 cm an. Diese Scheibe wird nun mittels eines Metallstiftes und Beilagscheiben an die Bohrmaschine befestigt. Bei ausreichend hoher Drehzahl der

Papierscheibe schafft man es, beim Anlegen der Kreide an die rotierende Scheibe, die Kreide komplett "durchzusägen".

Physikalische Erklärung:

Aufgrund der Trägheit wird das Papier dermaßen gestrafft, dass die Reibungskraft auf der Oberfläche des Papiers zwischen Papier und Kreide sehr hoch ist. Deshalb kann das Papier in die Kreide eindringen und wird zersägt. (vgl. Hilscher et al., 2004, S. 136f.)

2.13 Modellexperiment zur Abflachung der Erde

Material:

- 1 Holzkugel
- 2 Plastikkugeln
- 4 Streifen aus stärkerem Papier
- Metalldraht

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/AExxWW6gKdY

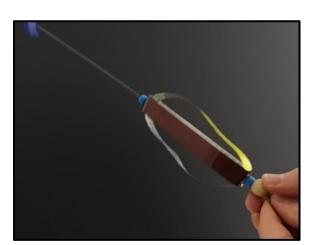


Abbildung 29: Ausgangsstellung des Experiments, eigenes Bild; Apparatur: TU Graz



Abbildung 30: Demonstrierung der Abflachung; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Um das Modellexperiment zur Abflachung der Erde zu verwirklichen, benötigt man vier stärkere Papierstreifen, die gemäß Abbildung 29 an einem Metalldraht angebracht werden. Zwei Plastikkugeln dienen als Lager des Modells, die frei beweglich sein müssen. Auch die zusätzlich befestigte Holzkugel auf der Unterseite darf nicht festsitzen. Der Metalldraht ist in

sich gewunden, weshalb bei Stauchung des Modells die Papierstreifen eine Drehbewegung ausführen. Der gewundene Metalldraht ist also mit der Drehbewegung gekoppelt. Mit dem Modell kann eine Abplattung demonstriert werden. Je schneller das Modell rotiert, desto stärker ist diese Abplattung zu erkennen.

Physikalische Erklärung:

Die schnelle Rotation des Modells verursacht eine Abplattung an den Enden und eine Wölbung in der Mitte. So entsteht bei schneller Drehung ein Rotationsellipsoid. Die Abflachungen an den Enden entsprechen den Abflachungen an Nord- und Südpol und der Wulst in der Mitte soll den Äquator der Erde darstellen. Dieses Experiment zeigt also, dass die Form der Erde eine Folge ihrer Rotation ist. Rotiert die Erde um seine eigene Achse, erfährt sie die Zentrifugalkraft. Diese ist am Äquator am größten und an den Polen null, weshalb die Form eines Rotationsellipsoids entsteht. Umgekehrt könnte man mit der Zentripetalkraft argumentieren. Die Verformung, also die Abplattung an den Polen und der Wulst am Äquator, gleicht diese Kraft gewissermaßen aus. Die Abplattung ist hier natürlich übertrieben dargestellt. In der Realität beträgt diese ca. 0,3 % des Erdradius.

(vgl. Leifiphysik: Abflachung der Erde, kein Datum)

2.14 Pfirsich in Sodawasser

Material:

- Pfirsich
- Sodawasser
- Gefäß

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/ygExG2OXeCo



Abbildung 31: Pfirsich in Sodawasser; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

Zunächst wird Sodawasser in ein Gefäß gefüllt. Nun legt man einen Pfirsich ins Sodawasser und beobachtet sogleich eine leichte Rotation des Pfirsichs. Wichtig dabei ist, dass der Pfirsich im Sodawasser schwimmt, er somit keinen Kontakt zum Gefäß hat und ein Teil des Pfirsichs an der Wasseroberfläche herausragt.

Physikalische Erklärung:

Es ist darauf hinzuweisen, dass das Gelingen dieses Experimentes nicht nur mit dem Einsatz eines Pfirsichs einhergeht, sondern auch mit jeder anderen Frucht, welche feine Härchen an der Oberfläche besitzt, durchgeführt werden kann.

Ein Pfirsich besitzt keine glatte Oberfläche, sondern weist eben feine Härchen auf. Legt man nun den Pfirsich in eine kohlensäurehaltige Flüssigkeit, bleiben die Bläschen der Kohlensäure an den Härchen der Pfirsichoberfläche hängen. An dem Teil des Pfirsichs, der an der Wasseroberfläche herausragt, entweichen nun die ersten Bläschen. Der Pfirsich verharrt nicht in seiner Position, wenn man ihn ins Wasser legt, sondern dreht sich ganz leicht zu Beginn. Wirft man einen Blick auf Abbildung 32, erkennt man, dass an der Seite des Pfirsichs, der sich leicht ins Wasser dreht, aufgrund der vorherigen Entweichung von Kohlendioxid-Bläschen, sich weniger solche als auf der gegenüberliegenden Seite des Pfirsichs befinden. Die größere Anzahl der Bläschen bewirkt eine größere Auftriebskraft auf einer Seite des Pfirsichs, woraus ein Drehmoment auf den Pfirsich resultiert wird und dieser die anfängliche leichte Drehbewegung behält. (vgl. Hilscher et al., 2004, S.275f.)

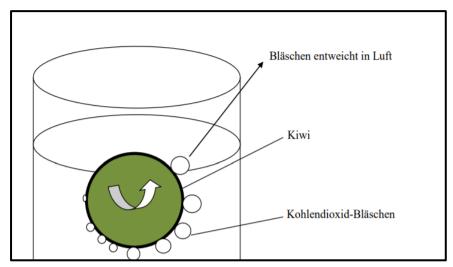


Abbildung 32: Skizze zur Physikalischen Erklärung: anstatt eines Pfirsichs ist hier eine Kiwi dargestellt; Quelle: http://physik.uni-graz.at/forscherwerkstatt/files/2019/exp01 02l.pdf

2.15 Plattenspieler mit Münzen

Material:

- 4 gleiche Münzen
- Plattenspieler
- Schallplatte

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/8yV2wa9vpeg



Abbildung 33: Plattenspieler mit Münzen; eigenes Rild

Versuchsaufbau:

Auf eine übliche Schallplatte werden vier 10 Cent Münzen in unterschiedlicher Distanz zur Rotationsachse platziert. Nach Einschalten des Plattenspielers (45 Umdrehungen pro Minute) erkennt man, dass die vierte Münze (äußerste Position bezüglich der Rotationsachse) als Erstes von der Platte rutscht, gefolgt von der dritten und anschließend der zweiten Münze. Die erste Münze (innerste Position bezüglich der Rotationsachse) rutscht nicht von der Schallplatte, sondern bleibt auf ihrer Position liegen.

Physikalische Erklärung:

Der Plattenspieler führt in diesem Experiment eine beschleunigte Bewegung durch, bis er eine maximale Winkelgeschwindigkeit ω (45 Umdrehungen pro Minute) erreicht. Die Münzen liegen in unterschiedlichem Abstand r zur Rotationsachse entfernt auf der Schallplatte auf, weisen aber alle die gleiche Masse m auf. Wenn die Platte zu rotieren beginnt, bewegen sich die Münzen mit der Geschwindigkeit v in eine Richtung, die tangential zur Kreisbahn der Münzen verläuft (siehe Abbildung 34). Nach dem 1. Newtonschen Gesetz ist die Tendenz eines jeden Körpers, sich in Ruhe oder gleichförmig auf einer geraden Linie zu bewegen, solange keine äußere Nettokraft auf ihn einwirkt. Damit die Münzen sich also auf einer Kreisbahn bewegen können und nicht von der Schallplatte abrutschen, ist eine Kraft erforderlich, die nach innen zur Rotationsachse gerichtet ist. Diese Kraft wird als Zentripetalkraft F_Z bezeichnet:

$$F_z = m \cdot \frac{v^2}{r} \tag{18}$$

Damit die Münze nicht von der Platte rutscht, muss also die Zentripetalkraft F_Z wirken (siehe Abbildung 35). Die notwendige Zentripetalkraft in diesem Experiment wird durch die Haftreibungskraft F_H zwischen Münze und Schallplatte aufgebracht.:

$$F_H = F_Z \tag{19}$$

Die Haftreibungskraft bewirkt also eigentlich, dass die Münze nicht von der Platte rutscht. Wenn der Plattenspieler also eine Rotationsbewegung mit konstanter Geschwindigkeit durchführen würde, wäre die Haftreibungskraft als wirkende Zentripetalkraft die einzige horizontal auftretende Kraftkomponente. Die Schallplatte wird jedoch beschleunigt, sodass die tangentiale Geschwindigkeit v zunimmt und dementsprechend auch eine immer größer werdende Kraft F_H erforderlich ist, um die Münze auf der Kreisbahn zu halten. Die Haftreibungskraft kann jedoch nicht unbegrenzt zunehmen. Sie ist durch die Masse m und dem Haftreibungskoeffizienten μ_H zwischen Münze und Platte abhängig. Die maximal aufzubringende Haftreibungskraft kann durch folgende Gleichung angegeben werden:

$$F_{H,max} = \frac{m \cdot v_{max}^2}{r} \tag{20}$$

Diese Gleichung besagt, dass ab einer bestimmten tangentialen Geschwindigkeit v der Münze, die eine bestimmte Geschwindigkeit v_{max} überschreitet, selbst die maximale Haftreibungskraft $F_{H,max}$ nicht mehr ausreicht, um die Münze auf der Schallplatte zu halten und die Münze somit von der Platte abrutscht. Folgende Bedingung beschreibt diesen Sachverhalt:

$$v > v_{max}$$
 (21)
 \rightarrow Münze rutscht von Schallplatte

Nun soll noch erklärt werden, warum die äußerste Münze als erstes und die innerste Münze gar nicht von der Platte rutscht. Da in diesem Experiment die Masse m und der Abstand R zwischen Münze und Rotationsachse festgelegt ist, kann zur Überschreitung der maximalen Haftreibungskraft nur die tangentiale Geschwindigkeit v der Münze herangezogen werden. Diese tangentiale Geschwindigkeit unterscheidet sich aufgrund des verschiedenen Abstandes R zur Rotationsachse bei jeder Münze und deshalb wird jede Münze den Wert v_{max} unterschiedlich schnell erreichen. Der Plattenspieler wird eingeschalten und auf die schlussendliche Winkelgeschwindigkeit ω beschleunigt. Aufgrund der Tatsache, dass

$$v = \omega \cdot r \tag{22}$$

ist, weist die äußerste Münze die größte tangentiale Geschwindigkeit auf. Die äußerste Münze wird bei Beschleunigung der Schallplatte aufgrund des größeren Abstandes zur Rotationsachse als erstes die maximale Geschwindigkeit v_{max} überschreiten. Wie oben erwähnt reicht die Haftreibungskraft damit nicht mehr aus, um die Münze auf der Schallplatte zu halten und sie rutscht ab. Die innerste Münze erreicht durch den geringen Abstand zur Rotationsachse keine genügend hohe tangentiale Geschwindigkeit v um die maximale Haftreibungskraft überschreiten zu können. Deswegen bleibt sie auch auf ihrer Position liegen.

(vgl. Hilscher et al.; 2004, S.120f.; Giancoli, 2010, S.153, 84f.)

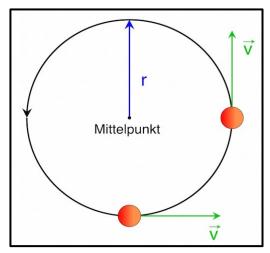


Abbildung 34: Geschwindigkeit tangential zur Kreisbahn, Quelle: https://physikunterricht-online.de/jahrgang-10/kreisbewegungen/

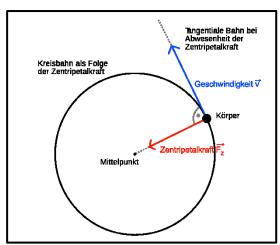


Abbildung 35: Kreisbahn als Folge der Zentripetalkraft: In diesem Experiment wird die Zentripetalkraft durch die Haftreibungskraft aufgebracht; Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Zentripetalkraft

2.16 Veranschaulichung der Zentripetalkraft und Drehimpulserhaltung mit dem "Schleudergerät"

Material:

- Faden
- Kugel
- Fineliner
- Büroklammer

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/612QVNcQEko

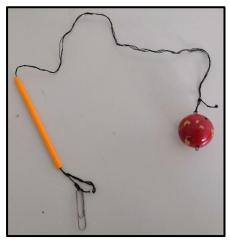


Abbildung 36: "Schleudergerät"; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz



Abbildung 37: Schleudern der Kugel auf einer Kreisbahn; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Zunächst präpariert man einen Fineliner derart, dass nur mehr seine Hülle vorhanden ist. Diese Hülle stülpt man dann über den Faden und bringt an dessen Ende jeweils eine Büroklammer und eine kleine Kugel an. Man führt nun leichte Schleuderbewegungen aus, indem eine Hand die Finelinerhülle und die andere Hand die Büroklammer hält. Man vergrößert den Radius der geschleuderten Kugel, indem die Finelinerhülle immer näher zur Büroklammer hinbewegt

wird. Nimmt man nun die Finelinerhülle und bewegt sie schnell zur geschleuderten Kugel heran, so verringert sich der Radius, wobei eine Erhöhung der Winkelgeschwindigkeit festgestellt wird.

Physikalische Erklärung:

Mit diesem Experiment können die Zentripetalkraft und die Drehimpulserhaltung demonstriert werden. Die zum Mittelpunkt gerichtete Zentripetalkraft F_Z ist jene Kraft, die notwendig ist, damit ein Objekt eine gleichförmige Kreisbewegung durchführen kann. (siehe Experiment 2.15 "Plattenspieler mit Münzen"). Sie hängt neben der Masse m eines Objekts von seiner Bahngeschwindigkeit v (tangentiale Geschwindigkeit) und seinem Bahnradius r ab (siehe Abbildung 38) Gleichung (18) beschreibt den Zusammenhang der beschriebenen physikalischen Größen, Abbildung 35 illustriert die Entstehung einer Kreisbahn als Folge der Zentripetalkraft.

Mit Gleichung (22) ergibt sich:

$$F_z = m \cdot \omega^2 \cdot r \tag{23}$$

Die Zentripetalkraft ist hier also durch die Winkelgeschwindigkeit ω und dem Radius rausgedrückt. Bei konstanter Masse kann demnach durch eine unterschiedliche Schleuderbewegung (Vergrößerung / Verringerung der Winkelgeschwindigkeit) und Veränderung der Fadenlänge (Vergrößerung/ Verringerung des Radius r) ein anderes Kräftegleichgewicht demonstriert werden. Mit dem Heranziehen der Finelinerhülle an die Kugel verringert sich auch das Trägheitsmoment des rotierenden Systems. Die Drehimpulserhaltung muss hier vorliegen, da das Heranziehen kein äußeres Drehmoment auf die Kugel hervorruft. Deshalb muss sich nach

$$L = I \cdot \omega \tag{24}$$

die Winkelgeschwindigkeit erhöhen, was auch der Fall ist. (das gleiche Prinzip wird in Experiment 2.3 "Experiment zur Drehimpulserhaltung: Drehstuhl und Gewichte" veranschaulicht).

Durch die Erhöhung der Winkelgeschwindigkeit wird dem System demnach Rotationsenergie der Form:

$$E_{Rot} = \frac{I \cdot \omega^2}{2} \tag{25}$$

zugeführt. Deshalb erhöht sich die Gesamtenergie des Systems.

(vgl. Hilscher et al., 2004, S. 201f.; Wilke et al., 2002, S.32f.)

2.17 Veranschaulichung der Zentripetalkraft und Drehimpulserhaltung mit einem "Spinning Clown"

Material:

• "Spinning Clown"

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/1u kZciDqOE



Abbildung 38:
"Spinning Clown";
eigenes Bild;
Apparatur: TU Graz

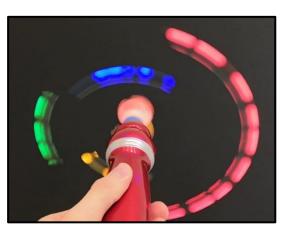


Abbildung 39: LEDs in Rotation; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Ein sogenannter "Spinning Clown" besteht aus vier unterschiedlich langen Kabeln, die jeweils mit einer bunten LED ausgestattet sind. Man kann den Clown als Spielzeug für Kinder beschreiben, da bei Rotation der LEDs ein farbenfrohes Spektakel präsentiert wird.

Der Versuchsaufbau ist denkbar einfach. Schaltet man den "Spinning Clown" ein, beginnen die vier Kabeln aufgrund ihrer unterschiedlichen Länge auf unterschiedlichen Bahnen um den Clownskopf zu rotieren. Die LEDs weisen eine unterschiedliche tangentiale Geschwindigkeit auf.

Physikalische Erklärung:

Grundsätzlich veranschaulicht das Experiment das gleiche physikalische Prinzip wie "Experiment 2.16" (Schleudergerät). Aufgrund einer nach innen, zum Mittelpunkt gerichteten Kraft (Zentripetalkraft), führen die LEDs eine Kreisbewegung aus. Die gelbe LED (kürzestes Kabel) weist neben dem kleinsten Bahnradius die kleinste tangentiale Geschwindigkeit auf, während die rote LED (längstes Kabel) die größte tangentiale Geschwindigkeit aufweist. Dies ist damit zu begründen, dass bei gleichem Zeitintervall die rote LED aufgrund des größeren Radius und den damit verbundenen längeren Weg eine größere Geschwindigkeit besitzen muss.

3 Hydrostatik und Hydrodynamik

3.1 Cartesischer Taucher

Material:

- Cartesischer Taucher (Flaschenteufel)
- Glaszylinder
- Gummipfropfen

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/xdvdZ7VZ6cA



Abbildung 40: Versuchsaufbau: Druckausübung auf den Pfropfen lässt den Taucher sinken; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz



Abbildung 41: Variante eines Cartesischen Tauchers, den man im Internet erwerben kann (rechts an der Taille des Körpers kann man gut die Öffnung nach außen erkennen); Quelle: https://www.experimentis.de/physikalis ches spielzeug/cartesische-taucher/

Versuchsaufbau:

Ein Glaszylinder wird randvoll mit Wasser inklusive dem "Cartesischen Taucher", auch als Flaschenteufel bekannt, befüllt, und mit einem Gummipfropfen verschlossen. Nun übt man Druck auf den Glaszylinder aus, indem man fest auf den Gummipfropfen drückt. Der Flaschenteufel sinkt und kann mit ein wenig Gefühl in Schwebe gehalten werden. Durch schnelles Drücken (Pumpen) auf den Gummipfropfen kann der Flaschenteufel auch in Rotation versetzt werden.

Physikalische Erklärung:

Der Cartesische Taucher bzw. Flaschenteufel ist ein Körper, der innen hohl ist und über eine kleine Öffnung nach außen verfügt. Damit der Cartesische Taucher nun zu Beginn schwimmt, wenn man ihn in den Glaszylinder legt, muss in diesem Hohlraum ein bestimmtes Verhältnis von Luft und Wasser vorliegen, sodass die Dichte des Tauchers gerade noch unter der Dichte von Wasser liegt. Durch Ausüben von Druck auf den Glaszylinder wird die Luft im Inneren des Flaschenteufels komprimiert und es kann Wasser eindringen. Sobald die Dichte des Flaschenteufels größer als die Dichte des Wassers ist, fängt er an zu sinken (Auftrieb < Schwerkraft). Durch Loslassen des Glaszylinders bzw. Gummipfropfen expandiert die Luft im Inneren des Körpers wieder und Wasser wird nach außen gedrückt, was zur Folge hat, dass die Dichte erhöht wird und der Flaschenteufel steigt. (Auftrieb > Schwerkraft) Schafft man es durch richtige Druckausübung die Dichte des Tauchers genau gleich groß wie die Dichte des umliegenden Wassers zu halten, schwebt der Taucher im Wasser (Auftrieb = Schwerkraft). Die Rotation des Cartesischen Tauchers ("Tanzen des Flaschenteufels") kann wie folgt erklärt werden: Wenn der Druck auf den Glaszylinder verringert wird und durch die Expansion der Luft im Inneren Wasser nach außen strömt, kann der Cartesische Taucher rotieren, indem die Öffnung des Tauchers eine kleine Wölbung aufweist und diese so ausgerichtet ist, dass das entweichende Wasser eine Tangente an die vertikale Achse des Tauchers bildet. Da der Gesamtimpuls erhalten bleiben muss, erfährt der Taucher ein Drehmoment und beginnt zu rotieren. (vgl. Leitner, 2017, S.10ff.)

3.2 Flaschentornado

Material:

- 2 Plastikflaschen
- Verbindungsstück ("Flaschentornado Adapter")

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/rZ1WSWvxH3Y



Abbildung 42: Flaschentornado; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

Zuerst wird eine der beiden Plastikflaschen mit Wasser befüllt. Diese werden dann mit einem sogenannten "Flaschentornado – Adapter" Verbindungsstück verbunden, welches man im Handel oder im Internet um ein paar Euro erwerben kann. Alternativ kann ein solches

Verbindungsstück auch selbst gebastelt werden. Wichtig dabei ist, dass die beiden Plastikflaschen luftdicht miteinander verbunden werden, sodass kein Wasser austreten kann. Nachdem die komplette Vorrichtung auf den Kopf gestellt wird, kann die Entstehung eines Wasserwirbels bestaunt werden, der so lange bestehen bleibt, bis das ganze Wasser von der oberen in die untere Flasche geronnen ist.

Physikalische Erklärung:

Damit der Wasserwirbel in der Flasche entstehen kann, muss während das Wasser hinunter fließt, auch Luft von der unteren in die obere Flasche gelangen. Dies erreicht man, indem die Vorrichtung mit viel Schwung gedreht bzw. eine kleine zusätzliche Kreisbewegung ausgeführt wird. Die Wassermoleküle setzen sich so in Bewegung und werden durch die Zentrifugalkraft nach außen an die Flaschenwand gedrückt, während in der Mitte ein "flüssigkeitsfreier" Bereich in Form eines Tornados entsteht, durch den die Luft nach oben gelangen kann. Demnach fließt die Flüssigkeit an der Flaschenwand der unteren Flasche spiralförmig nach unten.

(vgl. Steinwender, 2012, S. 50f.)

3.3 Segner'sches Wasserrad

Material:

- Bohrmaschine
- Faden
- Plastikflasche
- Schale
- Schere
- Stativmaterial
- Trinkhalme

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/CKN9rptI6WQ

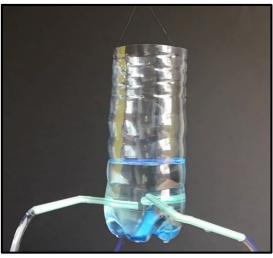


Abbildung 43: Selbstgebautes Wasserrad; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

Eine Plastikflasche wird mit einer Schere vertikal halbiert, wobei nur der untere Teil für das Experiment benötigt wird. In diesen unteren Teil der Flasche werden mit einer Bohrmaschine drei Löcher im gleichen Abstand gebohrt. In den Öffnungen werden Trinkhalme befestigt, die

alle in dieselbe Richtung umgebogen werden. Mittels Stativmaterial und Faden richtet man die Flasche so aus, dass sich diese in der Luft über dem Boden befindet und frei drehbar ist. Wenn man nun Wasser in die ruhende Flasche füllt, beginnt sich diese schnell zu drehen, während Wasser aus den drei Trinkhalmen ausläuft. Wichtig für den Erfolg des Versuchs ist es, dass kein Wasser zwischen Trinkhalm und Loch auslaufen kann, die Vorrichtung sozusagen komplett dicht ist.

Physikalische Erklärung:

Läuft das Wasser in einen Trinkhalm, weist es eine gewisse Geschwindigkeit und dementsprechend auch einen Impuls $\overrightarrow{p_1}$ auf. Ebenso besitzt es einen Impuls $\overrightarrow{p_2}$ wenn es aus dem Trinkhalm wieder ausläuft. Die Beträge dieser beiden Impulse unterscheiden sich jedoch nicht, da das Wasser im Trinkhalm seine Geschwindigkeit nicht ändert. Aufgrund der Impulsänderung mit der Zeit übt der Trinkhalm jedoch eine Kraft

$$\vec{F} = \frac{\vec{p}}{t} \tag{26}$$

auf das Wasser aus. Nach dem dritten Newton'schen Axiom ("actio = reactio") übt auch das Wasser eine gleich große Gegenkraft $\overrightarrow{F_1}$ auf den Trinkhalm aus. Abbildung 44 stellt dar, dass diese Kraft leicht in zwei Teilkräfte $\overrightarrow{F_{rad}}$ und $\overrightarrow{F_{tang}}$ zerlegt werden kann. Da unsere Vorrichtung drei Trinkhalme aufweist, heben sich die Kräfte $\overrightarrow{F_{rad}}$, gegenseitig auf. Die Kräfte $\overrightarrow{F_{tang}}$ hingegen heben sich nicht auf, womit ein Drehmoment erzeugt wird und die Flasche schließlich rotiert. (vgl. Hilscher et al., 2004, S. 42f.; Reddy, 2019, S. 115.)

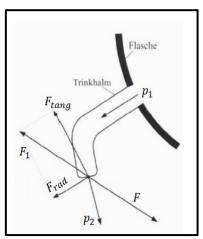


Abbildung 44: Darstellung der Kräfteverteilung auf den Trinkhalm; Quelle: Reddy, 2019, S.115.

3.4 Parabolische Oberflächenausbildung einer rotierenden Flüssigkeit

Material:

- Schwungmaschine
- Wasserbehälter

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/WVvh2Yle3qo

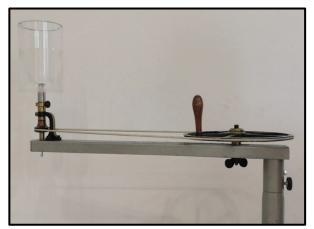


Abbildung 45: Versuchsaufbau: Parabolische Oberflächenausbildung; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz



Abbildung 46: Nahaufnahme; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Der Behälter wird ca. zu einem Viertel mit Wasser befüllt. Empfehlenswert ist hier der Einsatz von destilliertem Wasser, da kleine Spritzer unausweichlich sind und so keine unerwünschten Kalkflecken auftreten. Der Wasserbehälter wird schließlich mit der Schwungmaschine in Rotation versetzt. Man erkennt, dass die Oberfläche der Flüssigkeit ein Paraboloid bildet.

Physikalische Erklärung:

Betrachtet man ein Flüssigkeitsteilchen mit der Masse m, wirken auf diese unterschiedlichen Kräfte ein. Befindet sich die Flüssigkeit in Ruhe wirkt auf ein Teilchen nur die Gewichtskraft. Neben der Gewichtskraft wirkt bei Rotation des Wassergefäßes auch eine zur Flaschenwand gerichtete Kraft, die Zentrifugalkraft auf das Flüssigkeitsteilchen ein (siehe Abbildung 47):

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot r \tag{27}$$

Neben der Masse m stellt hier ω die Winkelgeschwindigkeit und r den Abstand zur Rotationsachse dar. Diese beiden Kräfte ergeben eine resultierende Kraft:

$$F = mg + mw^2r (28)$$

in Richtung der Seitenwand des Behälters. Um zu veranschaulichen, warum die Flüssigkeit nun ein Paraboloid bei Rotation formt, berechnet man die Steigung der Tangente ($\tan \alpha$) am Punkt A. Eine Parabel ist allgemein in der Form:

$$z(r) = a \cdot r^2 + C \tag{29}$$

gegeben. Die Steigung ($\tan \alpha$) erhält man durch Ableiten der Funktion:

$$\tan \alpha = \dot{z} = 2 \cdot a \cdot r \tag{30}$$

Die Steigung ist in diesem Experiment durch das Kräfteverhältnis:

$$\tan \alpha = \frac{F_1}{F_2} = \frac{mw^2r}{mg} = \frac{w^2}{g}r.$$
 (31)

gegeben. Da die Steigung einer Parabel wie erwähnt die erste Ableitung am Punkt widerspiegelt, integriert man das obige Ergebnis und erhält:

$$z(r) = \frac{w^2}{g} \int r \, dr = \frac{w^2}{2g} r^2 + C \tag{32}$$

Mit $z(0) = z_0$, ergibt dies $C = z_0$:

$$z(r) = \frac{w^2}{2g}r^2 + z_0. {(33)}$$

Die Oberfläche formt somit ein Rotationsparaboloid (vergleiche mit allgemeiner Gleichung der Parabel).

(vgl. Demtröder, 2018, S.165; Leifiphysik: Rotierendes Wassergefäβ, kein Datum)

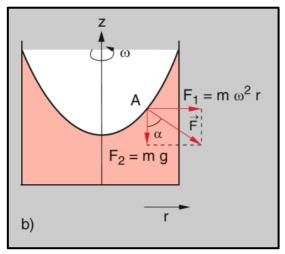


Abbildung 47: Skizze zum Versuchsaufbau; Quelle: Demtröder, 2018, S.165.

3.5 Wasserzähler

Material:

Wasserzähler

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/XzbqssBI68k



Abbildung 48: Üblicher Wasserzähler in einem Haushalt: Ablesung in Kubikmetern; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

In jedem Haushalt befindet sich eine Messeinheit für den Verbrauch von Kalt- und Warmwasser. Die Menge an Kubikmetern Wasser wird zuerst von einer solchen Messeinheit abgelesen, bevor das Wasser schließlich in unterschiedliche Leitungen aufgeteilt wird. Fließt Wasser, beobachtet man eine Rotation eines Zeigers am Wasserzähler. Dies resultiert aus einer Drehung einer Einheit im Wasserzähler, die nun erläutert werden soll.

Physikalische Erklärung:

Grundsätzlich gibt es unterschiedliche Varianten von Wasserzählen, üblich sind in Haushalten aber sogenannte Flügelradzähler. Diese bestehen aus einem metallischen Gehäuse, indem sich ein meist aus Kunststoff bestehendes Flügelrad befindet. Fließt Wasser, wird das Flügelrad in Drehbewegung versetzt. Zur Bestimmung der Menge an fließendem Wasser ist dieses Flügelrad mit einem Zählgetriebe verbunden, das mit einem Getriebe und Rollzählwerk ausgestattet und so in der Lage ist, eine Ablesung in Litern bzw. Kubikmetern durchzuführen. Eine solche beschriebene Einheit wird als Nassläufer bezeichnet, da zwischen Flügelrad und dem Getriebe des Zählwerks eine direkte Verbindung besteht, das Zählwerk dem Wasser also direkt ausgesetzt ist (siehe Abbildung 49). Ein Trockenläufer weist hingegen keine direkte Verbindung zwischen Flügelradachse und Zählergetriebe auf. Hier wird die Rotation der Flügelradachse und des Getriebes durch ein Magnetfeld, welches mittels zweier Magnete (Magnetkupplung) erzeugt wird, ermöglicht. Die Veränderungen des Magnetfeldes aufgrund des fließenden Wassers können registriert und auf das Zählergetriebe übertragen werden. (siehe Abbildung 50) Das Zählwerk bleibt somit trocken. Ein Vorteil eines Trockenläufers ist die Vorbeugung von möglicher Algenbildung am Zählergetriebe, Nachteil sind höhere Kosten aufgrund des größeren technischen Aufwandes. Ebenso unterschieden werden muss zwischen Einstrahl- und Mehrstrahlflügelradzählern (Abbildungen 51-52). Einstrahlflügelradzähler werden meist in Wohnungen eingesetzt. Wasser strömt an einer Seite ein- und an der gegenüberliegenden Seite direkt wieder aus. Mehrstrahlflügelradzähler basieren auf dem Prinzip, dass das Wasser auf mehrere Einlasskanäle auf das Flügelrad gelenkt und über mehrere Auslasskanäle wieder zusammenläuft. Solche Einheiten sind bei größeren Wassermengen sinnvoll, da die Flügelradachse gleichmäßiger belastet wird. Aus diesem Grund werden Mehrstrahlwasserzähler eher in Einfamilienhäusern eingesetzt.

(vgl. Kids and Sciences: Wie funktioniert eine Wasseruhr, kein Datum; Metherm informiert: Funktion von Wasserzählern, kein Datum)

In diesem Experiment wurde ein Mehrstrahlflügelradzähler/ Nassläufer beobachtet und gefilmt.

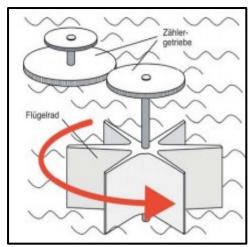


Abbildung 49: Nassläufer; Quelle: http://www.kunststofflager-verden.de/u/funktion-von-wasserzaehlern.pdf

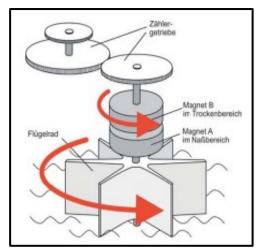


Abbildung 50: Trockenläufer; Quelle: http://www.kunststofflager-verden.de/u/funktion-von-wasserzaehlern.pdf

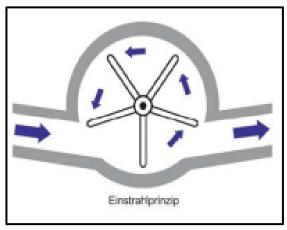


Abbildung 51: Einstrahlflügelradzähler; Quelle: http://www.kunststofflager-verden.de/u/funktion-von-wasserzaehlern.pdf

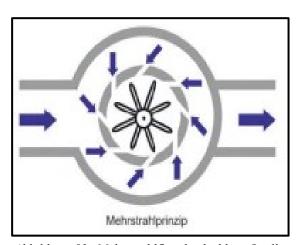


Abbildung 52: Mehrstrahlflügelradzähler; Quelle: http://www.kunststofflager-verden.de/u/funktion-von-wasserzaehlern.pdf

4 Akustik / Schwingungen und Wellen

4.1 Dopplereffekt mit einem Plastikrohr

Material:

• Rohr aus Plastik (PVC)

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/1z6lgB79npQ



Abbildung 53: Dopplereffekt mit einem Plastikrohr; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

Um einen Ton mit dem Plastikrohr zu erzeugen, lässt man es einfach über dem Kopf rotieren. Man nimmt eine sehr hohe und schnelle Frequenzänderung wahr.

Physikalische Erklärung:

Durch die gleichmäßige Rotation erzeugt das Rohr einen Ton. Das Rohr ist sozusagen die Quelle des Tons und bewegt sich abwechselnd zu einer Person (Empfänger), der das Experiment in einer gewissen Distanz beobachtet, hin und wieder weg. Bewegt sich die Quelle zum Empfänger hin, erhöht sich die Frequenz. Bewegt sich die Quelle vom Empfänger weg,

verringert sich die Frequenz. Diese Frequenzänderung je nach abnehmender oder zunehmender Entfernung einer Quelle wird in der Physik als Dopplereffekt bezeichnet.

Warum tritt dieses Phänomen auf? Eine ruhende Quelle sendet Schall mit einer bestimmten Frequenz in alle Richtungen aus. Bewegt sich nun die Schallquelle, wie in unserem Experiment das Rohr, sendet sie zwar Schallwellen mit der gleichen Frequenz aus, jedoch liegen die nach vorn emittierten Wellenfronten enger zusammen, als wenn die Quelle in Ruhe ist. Das liegt daran, da die bewegende Quelle den emittierten Schallwellen folgt und so der Abstand zwischen den einzelnen Wellenbergen kleiner ist. Resultierend sind mehr Wellenberge pro Sekunde und deshalb eine größere Frequenz. Umgekehrt weisen die nach hinten ausgestrahlten Wellenfronten im Vergleich zur ruhenden Schallquelle einen größeren Abstand auf (Quelle bewegt sich weg). Resultierend sind weniger Wellenberge pro Sekunde und eine geringere Frequenz. Zur Veranschaulichung soll der wahrnehmbare Frequenzunterschied beim Beobachter nun in mathematischer Schreibweise erläutert werden:

Die Wahrnehmung eines höheren Tons des Beobachters bei Annäherung des PVC- Rohres resultiert also aus dem Eintreffen der Wellenberge in kürzeren Abständen. Für die Frequenz f gilt in Zusammenhang mit der Schallgeschwindigkeit v und der Wellenlänge λ:

$$v = \lambda \cdot f \tag{34}$$

Zur Zeit t = 0 sendet die Quelle (Rohr) den ersten Wellenberg aus, wobei diese eine Distanz

$$s = v \cdot t \tag{35}$$

zurücklegt. Zur Zeit T hat sich die Quelle nun um die Distanz

$$s_s = v_s \cdot T \tag{36}$$

weiterbewegt und sendet wiederum einen Wellenberg aus. (siehe Abbildung 54). Der Beobachter registriert insgesamt somit folgende Wellenlänge λ' (mit $\lambda = s$):

$$\lambda' = s - s_s \tag{37}$$

$$\lambda' = \lambda - v_s T \tag{38}$$

Für die beim Beobachter registrierte Frequenz f' gilt dann:

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - v_s T} = \frac{v}{\frac{v}{f} - v_s T}.$$
(39)

Durch Erweitern des Bruches erhält man folgende Formel:

$$f' = f \cdot \frac{v}{(v - v_s)} \tag{40}$$

Analog kann die Frequenzverringerung durch die Bewegung des Rohres weg vom Beobachter berechnet werden. Durch Anpassen der Formel im Nenner erhält man:

$$f' = f \cdot \frac{v}{(v + v_s)} \tag{41}$$

Vergleicht man beide Ausdrücke wird der Frequenzunterschied ersichtlich. (vgl. Giancoli, 2010, S. 579f.)

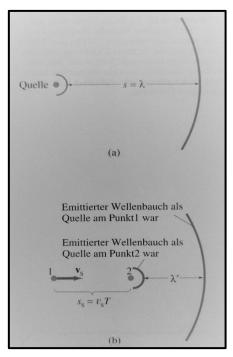


Abbildung 54: Frequenzänderung, Der kleine Kreis stellt die Schallquelle dar: a) Schallquelle in Ruhe, b) Schallquelle bewegt sich mit v_s; Quelle: Giancoli, 2010, S.580.

4.2 Erzeugung von Tönen mit einer Papierscheibe

Material:

- Bohrmaschine
- Luftgebläse (z.B. Kompressor)
- Metallstab
- Mutter
- Schere
- Stück Papier

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/ITGCzhcUazg

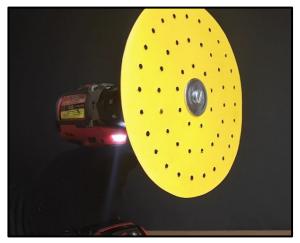


Abbildung 55: Anordnung der Löcher; eigenes Bild



Abbildung 56: Tonerzeugung; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

Zunächst wird aus dem Stück Papier mithilfe einer Schere ein Kreis mit einem Durchmesser von ca. 20 cm ausgeschnitten. In diese kreisförmige Papierscheibe werden nun kleine Löcher mit einem Durchmesser von ca. 0,5 cm in drei immer größer werdenden konzentrischen Kreisen angebracht (siehe Abbildung 55). Der Abstand zwischen diesen konzentrischen Kreisen ist unwichtig, der Abstand zwischen den einzelnen Löchern sollte sich aber nicht verändern. Diese Papierscheibe befestigt man nun mit einem Metallstab und einer Mutter an die Bohrmaschine.

Nun versetzt man die Papierscheibe in Rotation und richtet die Düse des Kompressors auf den äußeren konzentrischen Kreis der Papierscheibe, wobei ein recht hoher Ton ertönt. Dies wiederholt man dann mit dem mittleren Kreis und schließlich mit dem inneren Kreis, wobei eine stetige Verringerung der Tonhöhe festzustellen ist.

Physikalische Erklärung:

Aufgrund der Anordnung der Löcher können in diesem Experiment durch die damit bedingte periodische Unterbrechung des Luftstroms Töne erzeugt werden Die Frequenz f dieser Töne hängt grundsätzlich von der Zeit zwischen zwei Unterbrechungen Δt des Luftstroms ab:

$$f = \frac{1}{\Delta t} \tag{42}$$

Da in diesem Experiment die Zeit zwischen zwei Unterbrechungen bei allen drei konzentrischen Kreisen aber gleich ist, muss diese Formel abgeändert werden. Die unterschiedliche Tonhöhe kann durch Abbildung 57 erklärt werden. Hier sind der Abstand zwischen zwei Löchern Δs , der Abstand zwischen Kreismittelpunkt und einem Loch r, sowie der Winkel $\Delta \varphi$, unter dem zwei benachbarte Löcher vom Kreismittelpunkt aus erscheinen, dargestellt. Gemäß dieser Abbildung ist

$$\Delta s = r \cdot \Delta \varphi \tag{43}$$

Daraus folgt:

$$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \tag{44}$$

$$\to f = \frac{\omega}{\Delta \varphi} = \frac{\omega r}{\Delta s},\tag{45}$$

wobei ω die Winkelgeschwindigkeit der drehenden Papierscheibe ist. Da eine Kreisform vorliegt, kann die Anzahl der Löcher N in Zusammenhang mit r und Δs wie folgt dargestellt werden:

$$N = \frac{2\pi \, r}{\Delta s} \tag{46}$$

Deshalb folgt für die Frequenz f:

$$f = \frac{\omega N}{2\pi} \tag{47}$$

Die Anzahl der Löcher ist somit direkt proportional zur Frequenz des Tons, was in Einklang mit unserem Experiment steht. Der äußerste Kreis weist die größte Anzahl an Löchern auf, deshalb erzeugt er den höchsten Ton (hohe Frequenz). Der innere Kreis weist die kleinste Anzahl an Löchern auf, weswegen er den tiefsten Ton erzeugt (geringe Frequenz). (vgl. Hilscher et al., 2004, S.529f.)

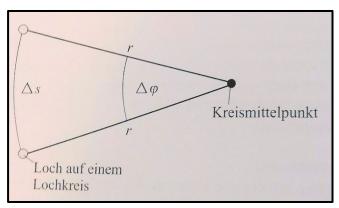


Abbildung 57: Skizze: Physikalische Erklärung; Quelle: Hilscher et al., 2004, S. 530.

4.3 Hui Hui Rädchen

Material:

- 2 kleine Holzstücke
- Holzleiste mit quadratischem Querschnitt
- Nagel
- Stanley- Messer

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/0ev-DzQkqNA

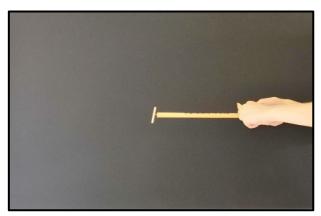


Abbildung 58: Hui Hui Rädchen; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

An einer Kante der Holzleiste werden mehrere Kerben eingeschnitzt (Vorsicht, Verletzungsgefahr!). Am Ende wird ein Nagel mit einem propellerähnlichem Holzstück so befestigt, dass sich dieses lose drehen lässt. Nun nimmt man ein zweites Holzstück und reibt mit festem Druck (mit einem Daumen wird zusätzlich Druck auf die Holzleiste ausgeübt) über die eingeschnitzten Kerben. Mit ein wenig Geduld lässt sich das als Propeller fungierende Holzstück am Ende der Holzleiste in Drehung versetzen.

Mit diesem Experiment können SchülerInnen meiner Meinung nach leicht zum Nachdenken angeregt werden. Die Tatsache, dass eine Hin- und Herbewegung des Holzstücks eine Drehbewegung ohne einen "Übertragungsmechanismus" auslösen kann ist für SchülerInnen wohl nur schwer nachzuvollziehen. Damit der Propeller rotieren kann, ist eine kreis- bzw. ellipsenförmige Schwingung des Nagels erforderlich. Diese kann durch eine Überlagerung zweier zueinander senkrechter linearer Schwingungen erreicht werden: Die Holzleiste erfährt durch das Reiben über die Kerben eine abwechselnd nach unten und nach oben gerichteter Kraft und wird demnach in Schwingung versetzt. Das schlussendliche Erreichen einer Drehbewegung am Propeller ist mit der Druckausübung des Daumens seitlich auf den Holzquerschnitt zu erklären. Hier wird zusätzlich eine zweite Schwingung erzeugt, die im Idealfall genau senkrecht zur Schwingung, die durch das Reiben der Holzleiste erreicht wird, ausgerichtet ist. Somit kann die notwendige ellipsenförmige Schwingung erzeugt werden. Durch eine exakte Überlagerung der Schwingungen lässt sich eine kreisförmige Schwingung des Nagels erreichen und die propellerähnliche Holzleiste rotiert gleichmäßig und schnell.

(vgl. Hilscher et al., 2004, S.225ff.; Schlichting/Backhaus, 1988)

4.4 Mit einem Joghurtbecher Musik hören

Material:

- Joghurtbecher
- Plattenspieler
- Schallplatte
- Stecknadel

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/DsLv0DGF1E4



Abbildung 59: Angepasster Joghurtbecher; eigenes Bild



Abbildung 60: Tonerzeugung mit Joghurtbecher; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

Zunächst steckt man durch den Boden des Joghurtbechers eine Stecknadel wie aus Abbildung 59 ersichtlich. Die Stecknadelspitze dieses angepassten Joghurtbechers versucht man nun mit viel Gefühl und mit einem Winkel von ca. 45° in die Rille einer rotierenden Schallplatte gleiten zu lassen, um so die gespeicherte Musik der Schallplatte erklingen zu lassen. Der Stecknadelkopf ersetzt sozusagen die eigentliche Diamantnadel des Plattenspielers.

(Hinweis: Es ist zu beachten, dass die Schallplatte nach diesem Experiment aufgrund der Schäden durch die Nadel nicht mehr funktionieren wird. Deshalb sollte eine nicht mehr benötigte Schallplatte verwendet werden.)

Physikalische Erklärung:

Jede Rille einer Schallplatte enthält durch ihre speziellen charakteristischen Auslenkungen und Tiefen eine einzigartige Information. Dieses gespeicherte Signal wird nun üblicherweise von einer Diamantspitze abgetastet, deren mechanische Schwingungen in ein elektrisches Signal umgewandelt und mittels eines Verstärkers wiedergeben werden. Früher waren Plattenspieler jedoch vollkommen mechanisch. Hier wurde ein großes Horn, welches die Funktion eines Resonanzkörpers hatte, benutzt, um die Schallwellen während der Wiedergabe zu verstärken. Unser nachgestelltes Experiment imitiert diese Funktionsweise: Die Stecknadelspitze tastet die Rille ab und überträgt die Schwingungen auf den Joghurtbecher, der als Resonanzkörper bzw. Verstärker dient. Somit kann ein Ton erzeugt werden. Bei modernen Plattenspielern funktioniert die Umwandlung in ein elektrisches Signal und die schlussendliche Wiedergabe des Tons wie folgt: Die Diamantspitze ist am Ende einer leichten Metallstange positioniert, welche als "Taststift" bezeichnet wird. Die mikroskopischen Stöße, die die Diamantspitze durch die Auslenkungen und Tiefen in der Rille erfährt, werden auf den Taststift übertragen. Dieser ist mit der sogenannten "Patrone" des Plattenspielers verbunden. Die Patrone dient zur Umwandlung der mechanischen Schwingungen in ein elektrisches Signal und enthält für diese Funktion entweder einen piezoelektrischen Kristall oder eine Anordnung von kleinen Spulen und einen Magneten. Mit einem piezoelektrischen Kristall funktioniert die Umwandlung, indem der Taststift bei Bewegung gegen den Kristall drückt und ihn dadurch in leichte Bewegung versetzt, wodurch ein elektrisches Signal erzeugt wird. Mit den Spulen und Magneten kann ebenfalls ein elektrisches Signal erreicht werden. Hier schiebt der Taststift den Magneten durch die kleinen Spulen, wodurch eine Spannung induziert und somit ein elektrisches Signal erzeugt wird. Die elektrischen Signale werden in beiden Fällen zu einem Verstärker weitergeleitet und mittels Lautsprecher wiedergegeben.

(vgl. Hilscher et al., 2004, S.491f.; Woodford: Record Players, 2019)

4.5 Wilberforce Pendel

Material:

- Massenstück (siehe Abbildung 61)
- Stativmaterial
- Wilberforce- Pendel

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/Ig1dBpcbiUQ

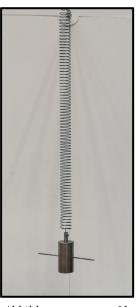


Abbildung 61: Wilberforce Pendel; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Das Wilberforce Pendel ist ein gekoppeltes Schwingungssystem, bestehend aus einer Masse, welche an einer Feder aufgehängt ist. Das Pendel wird mittels Stativmaterial aufgehängt. Nach Auslenken der Feder nach unten kann man eine abwechselnde Längs- bzw. Drehbewegung des Pendels beobachten. Das Experiment lässt sich in drei Phasen einteilen:

- Zunächst ist eine reine Längsbewegung zu erkennen, das Pendel führt keine Drehbewegung aus.
- Die Drehbewegung nimmt mit der Zeit zu, während die Längsbewegung abnimmt. An einem gewissen Zeitpunkt ist die Längsbewegung minimal.
- Die Drehbewegung nimmt wieder ab und die Längsbewegung nimmt zu. Ab einem gewissen Zeitpunkt ist die Drehbewegung minimal.

Diese Phasen wiederholen sich wechselseitig.

Physikalische Erklärung:

Das Wilberforce Pendel kann wie bereits erwähnt als ein gekoppeltes Schwingungssystem einer Dreh- und einer Längsbewegung aufgefasst werden. Die Masse und die Feder sind so miteinander verbunden, dass eine Drehung der Masse eine Verdrillung bzw. Stauchung /Dehnung der Feder bewirkt. Die im Versuchsaufbau beschriebenen Phasen können wie folgt erklärt werden: Durch das Auslenken der Masse nach unten wird die Feder gedehnt, wodurch die Masse ein kleines Drehmoment erfährt. Wenn die Feder eine Schwingung nach oben durchführt resultiert dies in einer Stauchung der Feder. Wiederum erfährt die Masse ein kleines Drehmoment, diesmal aber in die andere Richtung. Jede Schwingung der Feder führt also zu einem Drehmoment an der Masse, wodurch diese mit der Zeit von einer reinen Längsbewegung in eine Drehbewegung übergeht. Die Translationsenergie wird in Rotationsenergie umgewandelt. Wird die Drehbewegung nun maximal und herrscht keine Längsbewegung mehr vor, bewirkt die Drehung eine schnelle abwechselnde Stauchung und Dehnung der Feder. Eine Stauchung der Feder bewirkt wieder eine nach oben gerichtete Kraft, eine Dehnung eine nach unten gerichtete Kraft auf die Masse. Diese Kräfte bewirken, dass die Längsbewegung wieder Ab einem gewissen Zeitpunkt ist die Drehbewegung wieder minimal. Die zunimmt. Rotationsenergie des Systems wurde wieder in Translationsenergie umgewandelt.

(vgl. Wiespeiner, 2006, S. 32f.; Wikipedia: Wilberforce Pendel, kein Datum)

5 Wärmelehre

5.1 Feuertornado

Material:

- Brennspiritus
- drehbarer Unterteller
- Feuerzeug
- Papierkorb mit kleinen Einschlüssen (Gitter)
- Salz
- Schale

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/kRQw51RGWZg



Abbildung 62; Materialien für den Feuertornado; eigenes Bild



Abbildung 63: Flammentornado; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

Zunächst wird in eine Schale eine kleine Menge Brennspiritus eingefüllt und eine Brise Kochsalz hinzugegeben. Das Kochsalz dient dazu, dass die Flamme später in einem starken Gelb erstrahlt. Danach stellt man die Schale auf einen drehbaren Unterteller und positioniert den Papierkorb darüber. Mit einem Feuerzeug entzündet man das Brennspiritus – Salz Gemisch und beginnt, den Unterteller in Rotation zu versetzen. Mit ein wenig Gefühl entsteht eine hohe Feuerflamme, die an einen Tornado erinnert.

Physikalische Erklärung:

Grundsätzlich ist dieses Experiment dem physikalischen Prinzip der Konvektion (Wärmeströmung) zuzuordnen. Betrachtet man die ruhende Flamme, so erwärmt diese die umgebende Luftmoleküle und veranlasst diese, aufgrund der geringeren Dichte aufzusteigen. Durch Rotation des Drehtellers beginnen die vertikal aufsteigenden Luftmoleküle kreisförmige Bewegungen (Wirbel) um die Flamme auszubilden. Zusätzlich kommt es zur Interaktion mit den Luftmolekülen, die von außen durch die kleinen Einschlüsse des Gitters hineinströmen. Diese werden durch die Drehbewegung quasi mit nach oben gezogen. Je näher sich diese Luftmoleküle der Drehachse des Systems, also der Flamme befinden, umso größer ist deren Strömungsgeschwindigkeit. Durch dieses Phänomen, in der Strömungslehre als Pirouetten Effekt bezeichnet, entsteht ein Wirbelstrom (Feuertornado).

(vgl. Physikanten: Feuertornado, kein Datum)

5.2 Kerzenspiel als Konvektionsmotor

Material:

- Teelicht
- Kerzenspiel

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/hSYriPw2lxw



Abbildung 64: Kerzenspiel; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Ein angezündetes Teelicht wird unter ein sogenanntes "Kerzenspiel" oder auch Kerzenkarussell" genannt, positioniert. Sofort beobachtet man eine langsame Rotation des Kerzenspiels.

Physikalische Erklärung:

Dieses Experiment demonstriert das physikalische Prinzip der Konvektion (Wärmeströmung) sowie die Umwandlung von Wärmeenergie in kinetische Rotationsenergie. Die vom Teelicht

erzeugte warme Luft strömt aufgrund der geringeren Dichte nach oben (Konvektion). Das Kerzenspiel besteht an der Oberseite aus einer Scheibe, die frei drehbar gelagert ist. Auf dieser Scheibe befinden sich horizontal angeordnete, und in einen Winkel von 45° zum Teelicht ausgerichtete Blätter. Die aufsteigenden Luftmoleküle prallen nun mit einem bestimmten Impuls auf die einzelnen Blätter auf. Dieser muss gemäß der Impulserhaltung erhalten bleiben, womit sich die Konstellation aufgrund der Ausrichtung der Blätter zu drehen beginnt (siehe Abbildung 65).

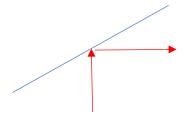


Abbildung 65: Ausrichtung eines Blattes (blaue Linie). Die Luftmoleküle prallen mit einem bestimmten Impuls (vertikaler roter Pfeil) auf und gemäß der Impulserhaltung (horizontaler roter Pfeil) beginnt sich das Kerzenspiel zu drehen.

5.3 Papierturbine

Material:

- Bunsenbrenner
- Faden
- Klebestreifen
- Papier
- Schere

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/CILgV6I4O2A



Abbildung 66: Papierturbine; eigenes Bild

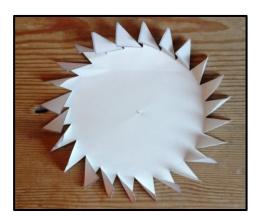


Abbildung 67: Papierturbine, Perspektive von unten; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

Ein Stück Papier wird gemäß Abbildung 67 ausgeschnitten: Es werden kleine "Fähnchen" gefaltet und diese so zurechtgebogen, dass sie einen Winkel von ca. 60° mit der Papierebene bilden. Das jetzige Papier, dass an eine Turbine erinnert, wird mittels Klebestreifen an einem

Faden angebracht, sodass die "Papierturbine" frei drehbar ist. Richtet man einen Bunsenbrenner unter die Papierturbine aus, kann man eine schnelle Rotation beobachten.

Physikalische Erklärung:

Die physikalische Erklärung gleicht Experiment 5.2. "Kerzenspiel als Konvektionsmotor". Der Bunsenbrenner erwärmt die Luftmoleküle, wodurch diese aufgrund der kleineren Dichte aufsteigen (Konvektion). Die kinetische Energie der aufsteigenden Luftmoleküle wird in mechanische Rotationsenergie umgewandelt. Das Experiment demonstriert somit wieder das physikalische Prinzip der Konvektion sowie die Umwandlung von Wärme in kinetische Rotationsenergie. (vgl. Sprockhoff, 1980, S141f.)

5.4 Thermobile

Material:

- Gefäß
- Heißes Leitungswasser (eventuell Wasserkocher)
- Thermobile

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/uPQGpny3grs



Abbildung 68: Thermobile in Wasser; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Ein sogenanntes Thermobile besteht aus einem Metalldraht, der um zwei drehbare Scheiben gewickelt ist. Taucht man nun das Ende einer Scheibe in heißes Wasser und stoßt eine der beiden Scheiben mit der Hand an, versetzt man das Thermobile in eine kontinuierliche Rotation. Der Name leitet sich deshalb wohl vom "Perpetuum Mobile" ab, da es scheinbar ohne äußere Energiezufuhr kontinuierlich rotiert, was einer Verletzung des Energieerhaltungssatzes entsprechen würde.

Es handelt sich bei diesem Experiment um keinen gewöhnlichen Metalldraht, der um die beiden Scheiben gewickelt ist, sondern um einen Draht, bestehend aus einer speziellen Legierung aus Nickel und Titan, namens Nitinol. Nitinol ist den sogenannten Formgedächtnis -Legierungen, auch Gedächtnismaterialien genannt, zuzuordnen. Eine solche Legierung weist die Eigenschaft auf, sich an dessen Ursprungszustand scheinbar "erinnern" zu können, nachdem die Legierung Das Geheimnis dieses "Formgedächtnisses" liegt in reversiblen verformt wurde. Phasenübergängen im Draht von einer kristallinen Struktur zur anderen. Bei diesen Übergängen werden mechanische und thermische Energie ausgetauscht. Der Nitinoldraht im Experiment wurde im Vorhinein derart präpariert, dass er ab einer Temperatur (ca. 60° C) die Form einer geraden Linie aufweist. Bei Raumtemperatur, den der Draht, bevor er Kontakt mit dem heißen Wasser erfährt, besitzt, verformt sich der Draht von der Form der geraden Linie, da er den Umrissen der Scheiben folgt. Bei einer Temperatur von ca. 60° formt sich der Draht leicht in seine ursprüngliche Form zurück und übt eine Kraft auf die untere Scheibe aus. Wenn das Thermobile aber per Hand am Anfang nicht angestoßen würde, wäre diese Kraft symmetrisch und es würde keine Rotation der Scheiben stattfinden. Stoßt man eine Scheibe an, neigt der Teil des Drahtes, der plötzlich vom Wasser erwärmt wird, sofort dazu sich zu dehnen. Der Teil des Drahtes, der das Wasser verlässt, kühlt aber schnell ab und verformt sich wieder langsam. Der Draht übt eine resultierende Kraft auf die Scheibe aus, wodurch sich die gesamte Konstellation dreht. Die kinetische Energie, die für die Bewegung des Drahtes und Scheiben benötigt wird, wird in diesem Experiment also durch die Wärme des Wassers geliefert. Es handelt sich hier also um eine Umwandlung von Wärme in kinetische Energie.

(vgl. Physics Fair Experiments: Thermobile, kein Datum)

5.5 Wachsender Messingdraht

Material:

- 2 leere Weinflaschen
- Bunsenbrenner
- Korken
- Stecknadel
- Stück Messingdraht mit einer Länge von ca. 50 cm
- Stück Papier

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/UvY4Gdjk3Uc



Abbildung 69: Versuchsaufbau: Messingdraht; eigenes Bild

Wachsender



Abbildung 70: Nahaufnahme; eigenes Bild

Versuchsaufbau:

Zwei leere Weinflaschen werden mit einem Abstand von ca. 0,5 m nebeneinander aufgestellt. In eine Flasche wird ein Korken gesteckt und ein Ende des Metalldrahtes im Korken befestigt, während das andere Ende des Drahtes lose auf die Öffnung der anderen Weinflasche gelegt wird. Unter dieser Öffnung befindet sich ebenfalls eine kleine Stecknadel, auf der ein Stück Papier angebracht ist, welches die in Abbildung 70 ersichtliche Form aufweist. Die Spitze soll

später die Richtungsänderung zeigen, wenn ein Bunsenbrenner den Messingdraht fortlaufend erhitzt. Nach einiger Zeit erkennt man schließlich, dass sich die Spitze des Drahtes von der Vorrichtung weggedreht hat bzw. gewandert ist.

Physikalische Erklärung:

Die meisten Stoffe dehnen sich bei Erhöhung der Temperatur aus und ziehen sich bei Verringerung der Temperatur zusammen. Die Längenänderung ΔL ist bei solchen Stoffen direkt proportional zur Temperaturänderung ΔT sowie zur Ausgangslänge L₀:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \tag{42}$$

α stellt eine Proportionalitätskonstante dar und beträgt für Messing $18.4 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\kappa}$. (vgl. Chemie.de: Ausdehnungskoeffizient, kein Datum) Diese materialspezifische Proportionalitätskonstante wird als linearer Ausdehnungskoeffizient bezeichnet. Erhitzt man nun den Messingdraht mit einem Bunsenbrenner, dehnt sich der Draht grundsätzlich in alle drei Dimensionen aus, besonders aber in seiner Länge. Für einen 50 cm langen Draht aus Messing ergeben sich deshalb auch für sehr große Temperaturänderungen nur sehr kleine Ausdehnungen im Bereich von Millimetern. In diesem Experiment wird die Ausdehnung dadurch ersichtlich, dass der sich ausdehnende Draht auf der Stecknadel liegt und deshalb ein Drehen der Stecknadel stattfindet, welches schließlich an der verändernden Zeigerposition des Stückes Papier zu erkennen ist. Dies kann nur stattfinden, da die kleine Ausdehnung des Drahtes ein Rollen der Stecknadel bewirkt, das durch die große Länge des Drahtes im Vergleich zur Stecknadel ungemein verstärkt wird. Es ist also diese "Übersetzung", die die Bewegung bzw. das Rollen der Stecknadel verursacht.

(vgl. Giancoli, 2010, S.604.; Hilscher et al., 2004, S. 578f.)

6 Elektrizität und Magnetismus

6.1 "Abschleppen" einer Dose mit einem Luftballon

Material:

- Leere Dose aus Metall
- Luftballon
- Stück Fell

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/qASDtbBbjS8



Abbildung 71: Der Luftballon "schleppt" die Dose ab; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Mithilfe eines Felles wird ein aufgeblasener Luftballon elektrostatisch aufgeladen. Auf einem flachen Untergrund (z.B.: Tisch) platziert man nun eine leere Metalldose und bringt den elektrostatisch aufgeladenen Luftballon nah an die Metalldose heran. Das "Abschleppen" der Dose erreicht man, indem man den Luftballon langsam von der Dose wegbewegt, wodurch diese durch die elektrostatische Anziehung mitgezogen wird.

Wie im Versuchsaufbau bereits beschrieben beschäftigt sich dieses Experiment mit der Thematik der Elektrostatischen Anziehung. Durch das Reiben des Felles an der Oberfläche des Luftballons wird dieser elektrisch aufgeladen. Der Luftballon weist somit eine negative Nettoladung auf. Wenn sich dieser nun der ungeladenen Metalldose nähert, kommt es zur Ladungstrennung (Influenz) in der Dose (siehe Abbildung 72). Die zum Ballon gerichtete Seite weist eine dem Ballon entgegengesetzte Nettoladung auf und aufgrund der nichtgleichnamigen Ladungen zwischen Luftballon und Metalldose ziehen sich beide gegenseitig an. Die Metalldose kann somit "abgeschleppt" werden.

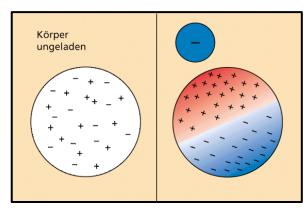


Abbildung 72: Links: Ballon bevor er mit dem Fell elektrisch aufgeladen wird, Rechts: Mit dem Fell aufgeladener Luftballon (blaue negative Ladung) nähert sich der Dose, infolge dessen eine Ladungstrennung (Influenz) in der Dose stattfindet; Quelle: https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon

6.2 Arago'sche Scheibe

Material:

• Aufbau einer Arago'schen Scheibe

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/psRhTmPAKa8



Abbildung 73: Arago'sche Scheibe; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Die "Arago'sche Scheibe" besteht einerseits aus einer Kupferscheibe und einem Magneten. Beide sind durch eine nichtleitende Glasscheibe voneinander elektrisch isoliert sind (links in Abbildung 73). Der Magnet ist so angebracht, dass er frei um die Achse rotieren kann. Eine weitere Scheibe aus Holz (rechts in Abbildung 73) wird mit einer Hand in Rotation versetzt. Die Holzscheibe ist mit der Kupferscheibe so verbunden, dass sich die Kupferscheibe ebenfalls zu drehen beginnt. Nach ein paar Umdrehungen beginnt sich der Magnet in dieselbe Richtung wie die Kupferscheibe zu drehen.

Das Experiment von Arago dient der Veranschaulichung und dem Nachweis von Wirbelströmen. Diese Induktionsströme können in jedem Leiter auftreten, der sich in einem Magnetfeld bewegt oder in dem sich der magnetische Fluss ändert. Die Richtung und die Stärke der Wirbelströme hängen von der zeitlichen Änderung des Magnetfeldes sowie der räumlichen Abhängigkeit des elektrischen Widerstands ab. Wirbelströme weisen die Eigenschaft auf, selbst ein Magnetfeld zu erzeugen, welches gemäß der Lenz'schen Regel der Änderung des Magnetfelds entgegenwirkt. Wenn die Kupferscheibe nun in Drehung versetzt wird, induziert das Magnetfeld des Magneten einen Wirbelstrom in der Kupferscheibe, dessen hervorgerufenes Magnetfeld den Magneten widerum veranlasst, sich in dieselbe Richtung mit der Kupferscheibe zu drehen. (vgl. Demtröder, 2013, S.128; Spektrum: Aragoscher Versuch, 1998)

6.3 Barlow'sches Rad

Material

- 2 Netzgeräte
- 4 Verbindungskabel
- Apparatur: Barlow' sches Rad (Kupferrad, Quecksilberwanne, 2 Spulen/ Magnete)
- Quecksilber

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/Jbn2G7AtdXA

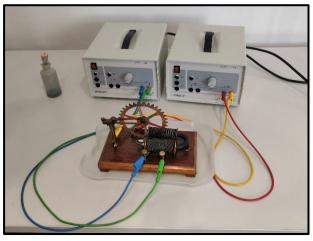


Abbildung 74: Versuchsaufbau: Barlow'sches Rad und Netzgeräte inklusive Verbindungskabeln; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Ein Barlow'sches Rad besteht aus einem Kupferrad, welches frei drehbar zwischen zwei Spulen positioniert ist. Der untere Rand des Rades taucht in flüssiges Quecksilber ein, welches in einer kleinen "Wanne" dafür eingefüllt wird. Nun legt man mittels zweier Verbindungskabel eine Spannung zwischen Quecksilberwanne und der Achse des Kupferrades an. Zwei weitere Kabel verbinden die beiden Spulen mit dem zweiten Netzgerät (siehe Abbildung 74). Fließt nun Strom, kann man eine Drehung des Kupferrades beobachten.

Dieses Experiment kann zur Demonstration der Ablenkung von Ladungsträgern aufgrund der Lorentzkraft, sowie der elektrischen Leitung in Metallen verwendet werden. Der untere Rand des Kupferrades ist in Quecksilber, einer leitfähigen Flüssigkeit, getaucht. Durch das Anlegen einer Spannung zwischen der Achse des Kupferrades und der Quecksilberwanne fließt ein Strom in radialer Richtung durch die Scheibe. Die Spulen erzeugen währenddessen ein Magnetfeld in axialer Richtung, weshalb die Elektronen im Kupferrad senkrecht zu ihrer Flussrichtung abgelenkt werden. Diese Ablenkung wird durch die Lorentzkraft \overrightarrow{F} hervorgerufen, die auf die Elektronen wirkt. Sie kann durch folgende Formel beschrieben werden:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \tag{43}$$

Die Lorentzkraft hängt somit von der Ladung q, der Geschwindigkeit \vec{v} der Elektronen, sowie der magnetischen Flussdichte \vec{B} ab. Das Kupferrad wird schließlich aufgrund der Reibung zwischen Elektronen und Metallatomen, die durch Stöße zwischen Elektronen und Metallatomen entsteht, durch diese Elektronenablenkung "mitbewegt" und es beginnt sich zu drehen. Durch Umpolung der Stromrichtung oder des Magnetfeldes kann eine Änderung der Rotationsrichtung des Kupferrades erreicht werden.

(vgl. Demtröder, 2013, S.100.; LP – Uni Göttingen: Das Barlow Rad, kein Datum)

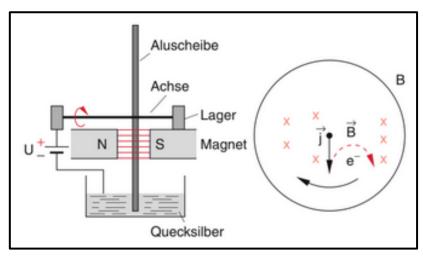


Abbildung 75: Prinzip des Barlow'schen Rades, statt eines Kupferrades wird das Experiment hier mit einer Aluminiumscheibe dargestellt; Quelle: Demtröder, 2013, S.100.

6.4 Einfacher Gleichstrommotor

Material:

- 2 Permanentmagnete
- "Batteriefach" mit Anschlüssen aus Kupfer
- Batterie (1,5 V)
- Selbst gewickelter Draht aus Kupfer (siehe Abbildung 77)

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/bDHY9FNq784



Abbildung 76: Selbstgebauter Elektromotor; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

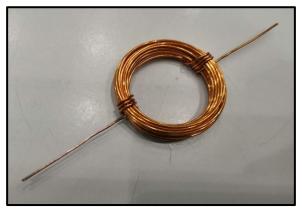


Abbildung 77: Selbstgewickelter Kupferdraht, am unteren Ende erkennt man die abisolierte Stelle; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Eine 1,5 V Batterie (Größe D) wird in ein für die Größe entsprechendes "Batteriefach" platziert. Zusätzlich positioniert man auf der Batterie zwei kleine Permanentmagnete. Der selbstgewickelte Draht aus Kupfer wirkt als einfache Spule und muss an beiden überstehenden Drahtenden (auf der gleichen Seite!) abisoliert werden. Dies erreicht man, indem man mit einem scharfen Messer die isolierende Lackschicht des Kupferdrahtes entfernt. An einem Drahtende kann auch die zweite Seite abisoliert werden. Wichtig ist nur, dass eine Seite an einem Drahtende immer noch eine Isolierung aufweist. Der Kupferdraht wird nun auf die mit der Batterie verbundenen Anschlüsse gelegt, wonach er ohne Hilfe von selbst um seine eigene

Achse rotiert. Die angepasste Kupferspule fungiert sozusagen als Rotor des Elektromotors. Möglicherweise muss der Kupferdraht, bevor er eine kontinuierliche Rotation durchführen kann, kurz mit der Hand angestoßen werden.

Physikalische Erklärung:

Ein Elektromotor wandelt elektrische Energie in mechanische Energie um. Der selbstgebaute Gleichstrommotor besteht neben der Batterie und den Permanentmagneten aus einer einfachen selbst gewickelten Kupferspule, die als Rotor des Motors bezeichnet werden kann. Damit im Kupferdraht ein Strom fließt und er somit eine gleichbleibende Rotation durchführen kann, müssen die abisolierten (leitenden) Stellen der Drahtenden mit den Anschlüssen der Batterie in Verbindung stehen. Ist dies zu Beginn nicht der Fall, benötigt der Elektromotor wie erwähnt einen kleine "Starthilfe" und muss dementsprechend kurz mit der Hand angestoßen werden. Die Batterie versorgt die Vorrichtung nun gleichmäßig mit Spannung und das Magnetfeld des Permanentmagneten übt eine Kraft (Lorentzkraft) auf den Teilchenstrom im Kupferdraht aus. Diese Kraft übt ein Drehmoment auf den Draht aus, weshalb dieser eine Rotationsbewegung ausführt. Wenn sich der Draht nun um seine vertikale Achse dreht, liegen die isolierten Stellen des Kupferdrahtes auf den Anschlüssen, womit kein Strom mehr durch den Kupferdraht fließt. Der Rotor dreht sich aufgrund der Trägheit aber etwas weiter, sodass wieder die leitende Fläche des Drahtes auf den Kontakten aufliegt und ein Strom fließen kann, wodurch wiederum ein Drehmoment auf den Draht ausgeübt wird. Somit kann eine gleichbleibende Rotation des Rotors erfolgen. Bei Umkehrung der Polung der Spannungsquelle ändert sich die Drehrichtung des Motors. Nun stellt sich vielleicht die Frage, warum nicht beide Drahtenden vollständig abisoliert werden. Der Rotor würde demnach gleichbleibend mit Strom durchflossen werden, wodurch eine ebenfalls, so würde man meinen, kontinuierliche Rotation erreicht wird. Dies ist aber bei einem Motor, der mit Gleichstrom betrieben wird, nicht der Fall. Eine vollständige Isolierung würde nämlich eine gleichbleibende Stromrichtung bewirken. Die Kraft, die das Magnetfeld des Permanentmagneten auf den Strom in der Kupferspule ausübt, würde die Spule bei gleichbleibender Stromrichtung wieder "zurücktreiben", weshalb keine Rotationsbewegung aufrechterhalten wird. (siehe Abbildung 78) Für einen funktionierenden Gleichstrommotor ist es deshalb von Bedeutung, für eine Stromumkehr nach halber Umdrehung der Spule zu sorgen. Dies wird bei einem Gleichstrommotor durch einen Polwender (Kommutator) erreicht. Der Aufbau eines Kommutators wird in Abbildung 79 illustriert. Dieser besteht für den Fall einer einzigen Spule aus zwei Hälften, die voneinander elektrisch isoliert sind. Die beiden Hälften weisen jedoch eine leitende Verbindung zu den beiden Enden der Spule auf. Die Drehung der Spule samt Kommutator bewirkt eine ständige Umkehrung der Stromrichtung nach halber Umdrehung, wodurch eine kontinuierliche Rotationsbewegung der Spule (Rotor) erreicht wird. zu In unserem einfachen aufgebauten Experiment wird die Stromumkehr nicht durch die Anordnung gemäß Abbildung 79 erreicht, sondern durch die abisolierten Stellen des präparierten Drahtes. Liegen die abisolierten Stellen an den Anschlüssen der Batterie auf, fließt Strom, liegen die isolierten Stellen auf, fließt kein Strom, womit wie oben skizziert ein fortlaufendes Drehmoment auf den Draht wirken kann und er kontinuierlich rotiert.

(vgl. Demtröder, 2013, S.142.; Hilscher et al., 2004, S. 697f.; Giancoli, 2010, S. 932.)

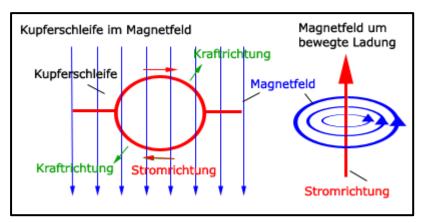


Abbildung 78: Skizze zum Experiment: Kupferschleife befindet sich in einem Magnetfeld und erfährt eine Kraft,; Quelle: https://www.experimentis.de/experimente-versuche/elektrizitaet-magnetismus/gleichstrommotor/

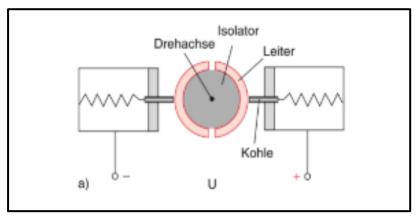


Abbildung 79: Aufbau eines Kommutators (rot markiert); Quelle: Demtröder, 2013, S. 142.

6.5 Elektrischer Wind

Material:

- Kerze
- Metallspitze
- Van de Graaf Generator

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/70tNDkcpVNQ

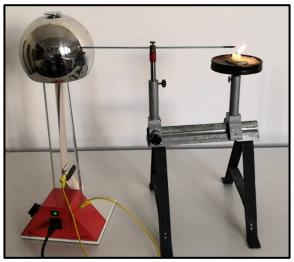


Abbildung 80: Versuchsaufbau; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Ein Van de Graaf – Generator wird gemäß Abbildung 80 mit einer Metallspitze in Kontakt gebracht. Die Kerze wird so positioniert, dass sich die Kerzenflamme und die Metallspitze auf gleicher Höhe befinden, mit einem Abstand von ca. 1 cm. Durch das Einschalten des Generators bewirkt man, dass sich die Kerzenflamme seitlich von der Metallspitze weg neigt. Die Kerzenflamme neigt sich also scheinbar ohne jegliche "Hilfe" zur Seite, weshalb das Experiment meiner Meinung nach sehr gut geeignet ist, um einen Überraschungseffekt bei SchülerInnen zu erzielen.

Dieses Experiment dient der Veranschaulichung des physikalischen Phänomens der Spitzenentladung, die an unter Hochspannung stehenden Leitern an Spitzen hervorgerufen wird. Die Hochspannung wird in diesem Experiment durch den Van de Graaff- Generator erzeugt, dessen Funktionsweise im Experiment 6.8 (Van de Graaff- Generator) erläutert wird. Verbindet man nun den Generator mit der Metallspitze gemäß Abbildung, so entsteht nach dem Prinzip der Spitzenentladung aufgrund der Hochspannung eine sehr hohe elektrische Feldstärke an der Metallspitze. Die elektrische Feldstärke E beschreibt die wirkende Kraft F auf eine positive Testladung q im elektrischen Feld:

$$E = \frac{F}{q} \tag{44}$$

Je dichter die Feldlinien um die Ladung, desto höher ist die elektrische Feldstärke um diesen Punkt. Abbildung 81 stellt die Abhängigkeit der Feldliniendichte zum Radius r einer punktförmigen Ladung dar. Hier ist zu erkennen, dass bei der Ladung mit dem kleineren Radius die Feldlinien dichter austreten als bei der größeren Ladung, die strichliert dargestellt ist. Die Metallspitze kann als kleine Oberfläche einer Kugel angesehen werden. Nach dem Coloumb'schen Gesetz $(F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q^2}{r^2})$ ergibt sich dann für die elektrische Feldstärke:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} \tag{45}$$

Da die Metallspitze Teil eines Leiters ist und unter konstant hoher Spannung U steht, wird daraus:

$$E = \frac{U}{r} \tag{46}$$

Man sieht: Je kleiner der Radius, also je spitzer der Gegenstand, desto größer die elektrische Feldstärke. Je nach Polarität werden die umliegende Elektronen von der Metallspitze nun abgestoßen oder angezogen. Mit den umgebenden Luftmolekülen kommt es dadurch bei genügend hoher Feldstärke zu einer Stoßionisation, die als "elektrischer Wind" sichtbar wird. Die durch die Stoßionistation mitgerissenen Luftmoleküle erklären somit die Neigung der Kerze. (vgl. Sprockhoff et al., 1978, S. 157f.; Wikipedia: Spitzenentladung, kein Datum)

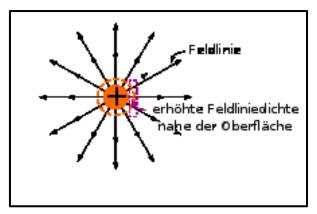


Abbildung 81: Abhängigkeit der Feldliniendichte bezüglich Radius der Punktladung; Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Spitzenentladung

6.6 Influenzmaschine

Material:

• Influenzmaschine

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/CPXUCv-ilLw

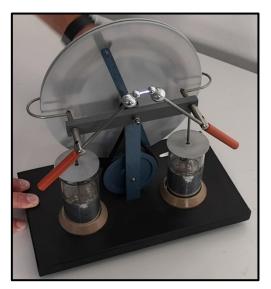


Abbildung 82: Influenzmaschine; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

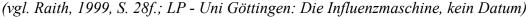
Versuchsaufbau:

Eine Influenzmaschine besteht grundsätzlich aus zwei großen Scheiben aus Kunststoff, auf deren Seiten sich regelmäßig angeordnete Leiterplättchen (Aluminiumstreifen) befinden, und einer angebrachten Kurbel. Abbildung 83 skizziert den weiteren Aufbau: Jede Scheibe enthält zwei "Metallbüschel", die mit einem sogenannten Stromsammler (Konduktor) verbunden sind. Dieser ist wiederum mit zwei Kondensatoren, in diesem Fall zwei Leidener Flaschen, verbunden. Die Leidener Flaschen können als eine alte Bauform eines Kondensators angesehen werden. Diese bestehen aus zwei Glasgefäßen, die an der Außen- und Innenseite mit Metallstreifen ausgestattet sind, welche die Kondensatorplatten bilden. Das Glas zwischen ihnen fungiert als Dielektrikum (Isolator).

Die Versuchsdurchführung ist denkbar einfach: Dreht man an der Kurbel, drehen sich beide Platten gegenläufig und zwischen zwei angebrachten Elektroden wird ein Funke sichtbar.

Physikalische Erklärung:

Influenzmaschinen können als elektrostatische Generatoren bezeichnet werden, welche das Prinzip der Ladungstrennung durch Influenz beschreiben. Die Funktionsweise soll nun gemäß Abbildung 84 erläutert werden. Die Leiterplättchen (Aluminiumstreifen) sind hier zum besseren Verständnis durch Kästchen ersetzt. Zunächst werden die beiden Leiterplättchen mit positiver Ladung auf der linken Seite betrachtet: Die Metallbüschel nehmen die Ladung ab und leiten sie zum linken Konduktor (durch Plus dargestellt). Die Leiterplättchen sind nun beinahe frei von Ladung, während im darüberliegenden äußere Leiterplättchen eine Ladungstrennung durch Influenz stattfindet, begründet durch die positive Ladung des inneren Plättchens. Geht man nun im Uhrzeigersinn weiter, wird die positive Influenzladung im äußeren Leiterplättchen durch die Metallbüschel und der Leitung der negativen Influenzladung in der entgegengesetzt liegenden Stellung neutralisiert. Betrachtet man die oberste Position, weist das äußerste Leiterplättchen jetzt eine negative Ladung auf. Diese Ladung wird bis zur Position rechts aufrechterhalten, bis die Ladung wieder über die Metallbüschel zum rechten Konduktor geleitet wird (mit Minus gekennzeichnet). Analog zu dieser Beschreibung verhält sich das innere Leiterplättchen, welches sich gegen den Uhrzeigersinn bewegt. Insgesamt herrschen bei einer vollen Umdrehung zweimal innen und zweimal außen Influenzwirkungen vor. Die mit den Konduktoren verbundenen Leidener Flaschen speichern die Ladung und ab einer gewissen Rotationsgeschwindigkeit kann es schließlich aufgrund der sehr großen Aufladungen zu Spannungsüberschlägen kommen, die als Funken zwischen den Elektroden sichtbar werden.



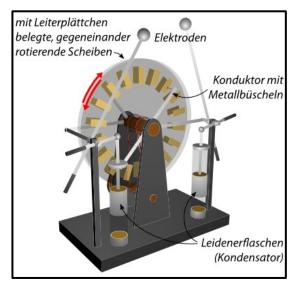


Abbildung 83: Skizze einer Influenzmaschine; Quelle: https://lp.uni-goettingen.de/get/text/2357

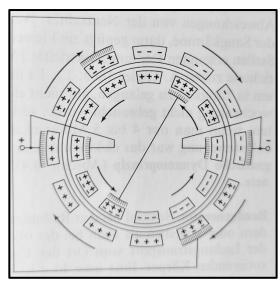


Abbildung 84: Funktionsprinzip einer Influenzmaschine, Quelle: Raith, 1999, S. 29.

6.7 Solarzelle

Material:

- Lichtquelle (Lampe, Sonnenlicht)
- Solarzelle
- "Windrädchen" mit kleinem Elektromotor

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/RpYoalJ8-uI

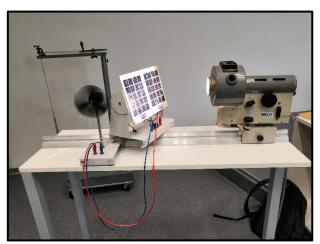


Abbildung 85: Versuchsaufbau: Lichtquelle und Solarzelle; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Ein "Windrädchen", das mit einem Elektromotor verbunden ist, wird mittels Verbindungskabeln an eine Solarzelle angeschlossen. Diese wird nun mithilfe einer Lichtquelle (Lampe oder Sonnenlicht) bestrahlt. Man kann beobachten, wie sich das Windrädchen schnell in Rotation versetzt.

Physikalische Erklärung:

Wird die Solarzelle mit Lichtenergie bestrahlt, wandelt diese die Lichtenergie in elektrische Energie um und versorgt somit einen kleinen Elektromotor, der das Windrädchen antreibt. Lichtenergie wird also in elektrische Energie und schließlich in mechanische Rotationsenergie Je stärker die Lichtintensität der Quelle, umso ist die umgewandelt. größer Rotationgeschwindigkeit des Rädchens. Das Grundprinzip einer Solarzelle nun kurz skizziert werden: Diese besteht zum Großteil aus dem Element Silizium. Silizium ist ein Halbleiter, welcher vier Außenelektronen aufweist. Das Grundprinzip der Erzeugung von Strom basiert nun auf der gezielten "Verunreinigung" des Siliziums, indem man eine geringe Menge an anderen Stoffen mit drei oder fünf Außenelektronen einbringt. Verunreinigt man Silizium zum Beispiel mit Arsen, das 5 Außenelektronen aufweist, "passt" das überschüssige Außenelektron, nicht in die Anordnung (Kristallgitter) des Siliziums "hinein". Die Folge daraus ist, dass das überschüssige Elektron sich nun frei bewegen und zur Leitfähigkeit beitragen kann. Die Verunreinigung des Siliziums mit Arsen wird als n- Dotierung und die verunreinigende Siliziumschicht der Solarzelle als n-Schicht bezeichnet. Umgekehrt bewirkt eine Verunreinigung durch ein Element mit drei Valenzelektronen eine p- Dotierung. Dies kann zum Beispiel mit dem Element Bor erreicht werden. Hier fehlt nun ein Außenelektron, um ins Gitter des Siliziums zu passen, weshalb hier kein frei umherschwirrendes Elektron die Folge ist, sondern ein sogenanntes "Elektronenloch", das als positive Ladung interpretiert werden kann. Die dementsprechende Schicht in der Solarzelle wird analog als n- Schicht bezeichnet. n- und p- Dotierung bezieht sich also auf die relative Anzahl der frei beweglichen Elektronen. Bringt man nun n- und p dotierte Schicht zusammen, kommt es in der sogenannten Grenzschicht zum Auffüllen der Elektronenlöcher im p-dotierten Halbleiter durch die im n-dotierten Halbleiter befindlichen überschüssigen, frei beweglichen Elektronen. Man nennt dies dann den "p-n Übergang". Dieser Vorgang in der Grenzsicht erzeugt eine elektrische Spannung im Material. Dieser Vorrang ist nicht beliebig lang wiederholbar. Fällt nun aber Licht in diese Grenzschicht, so kann aufgrund der Energie des Lichts ein Elektron von einem Atom getrennt werden. Es entsteht ein wieder ein freies Elektron und ein dazugehöriges Elektronenloch. Die Elektronen wandern in Richtung der n-Schicht und die Elektronenlöcher in Richtung der p- Schicht ab. Am Pol werden die Elektronen über eine spezielle Metallschicht abgeleitet, fließen über einen Leiter und erzeugen schlussendlich Gleichstrom.

(vgl. Wilke et al., 1999, S. 87f.; Apolin, 2008, S. 111.)

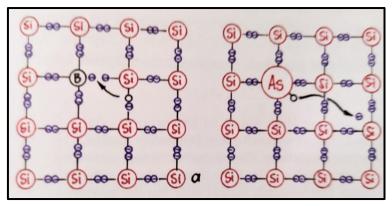


Abbildung 86: Verunreinigung bzw. Dotierung von Silizium mit Arsen/Bor; Quelle: Apolin, 2018, S. 111.

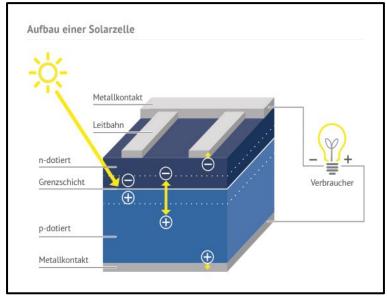


Abbildung 87: Aufbau einer Solarzelle, Quelle: https://www.solaranlage.de/technik/solarzellen

6.8 Van de Graaff - Generator

Material:

- Metallbügel
- Van de Graaff Generator

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/-5C7I2p5xdE



Abbildung 88: Van de Graaff-Generator; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Ein Van de Graaf Generator besteht aus einer leitenden Kugel und einer nichtleitenden länglichen Säule, worauf die Kugel angebracht ist. Auf der Kugel befestigt man einen Metallbügel, der frei drehbar sein soll. Im Inneren der Vorrichtung befindet sich ein sogenanntes Transportband, welches sich beim Anlegen einer Spannung in Bewegung versetzt. Nach Anlegen der Spannung kann man eine Rotation des Metallbügels beobachten.

Ein Van de Graaf Generator ist in der Lage, eine sehr große Spannung, sogar Millionen von Volt, zu erzeugen. Er beruht auf dem Phänomen der Ladungsverteilung (Influenz) bzw. dem Transport von Ladungen. Abbildung 89 illustriert die Funktionsweise: Im Punkt B werden aus einer Spitzenelektrode, die unter sehr hoher Spannung steht, Elektronen aus dem Transportband herausgelöst. Das Band bleibt also positiv geladen zurück und transportiert die positiven Ladungen aufwärts, wo sie im Punkt A von einem sogenannten Leiterkamm, der mit der Innenwand der Kugel verbunden ist, abgenommen werden. Aufgrund der Influenz verschieben sich die Ladungen der Kugel sofort auf die Oberfläche, während das Innere der Kugel feldfrei bleibt. Die Höhe der Spannung, die so erzeugt werden kann, ist proportional zur Ladung, die mit dem Band nach oben gebracht wird. Die Ladung, die sich auf der Außenfläche der Kugel befindet, stehen in Kontakt mit dem Metallbügel (Form gemäß Abbildung 90). Resultierend ist eine Ladungsverteilung im Metallbügel. An dessen Spitzen entsteht aufgrund der Hochspannung eine sehr hohe elektrische Feldstärke und Ladung tritt aus. (Spitzenentladung siehe Experiment 6.5 "Elektrischer Wind") Die Ladung an den Spitzen und die umgebende Luft besitzen eine gleichnamige Ladung und stoßen sich dementsprechend voneinander ab. In Kombination mit der Form des Bügels erklärt dies die schnelle Rotation des Bügels.

(vgl. Giancoli, 2010, S.817.; Demtröder, 2013, S.18f.)

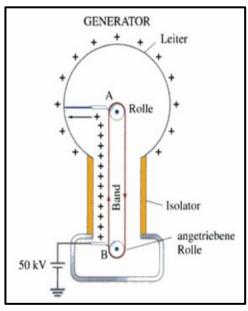


Abbildung 89; Skizze und Funktionsweise des Generators; Quelle: Giancoli, 2010, S. 817.

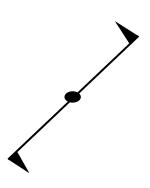


Abbildung 90: Form des Metallbügels

6.9 Drehstrommotor

Material:

- 3 Spulen (500 Windungen) mit Eisenkern
- Netzgerät
- Rotierbare, magnetisierbare Scheibe
- Unterlage aus Holz
- Verbindungskabeln

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/-D5NTPikQvg

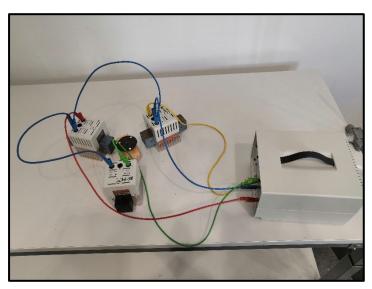


Abbildung 91: Versuchsaufbau: Drehstrommotor; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Zuerst wird eine rotierende Scheibe aus einem magnetisierbaren Material mittels eines Holzklotzes so angebracht, dass die Scheibe frei drehbar ist. Nun werden drei feststehende, um 120° gegeneinander versetzte Spulen (500 Windungen) mit Eisenkern um die Scheibe positioniert. Über Verbindungskabeln werden die Spulen gemäß Abbildung 91 mit einem Netzgerät verbunden. Schaltet man nun das Netzgerät ein beginnt die Scheibe schnell zu

rotieren. Tauscht man an zwei Spulen die Verbindungskabeln und kehrt so die Stromrichtung um, rotiert die Scheibe in die andere Richtung.

Physikalische Erklärung:

Dieses Experiment veranschaulicht das physikalische Konzept eines Drehstrommotors. Es besteht aus drei feststehenden, um 120° gegeneinander versetzte Spulen, die jeweils mit dem Netzgerät verbunden sind. Aufgrund der Anordnung beträgt die Phasenverschiebung zwischen den in benachbarten Spulen induzierten Spannungen also genau 120°. Jede Spule erzeugt ihr eigenes wechselndes Magnetfeld, deren Summe ein rotierendes Magnetfeld darstellt. Die Scheibe fungiert als Leiter im diesem sich veränderten drehenden Magnetfeld und die daraus resultierende veränderliche elektrische Feldstärke induziert einen Strom, der nach der Lenz'schen Regel seiner Ursache entgegenwirkt. Die in der Scheibe induzierten Wirbelströme veranlassen diese, sich in Drehrichtung des Feldes mitzubewegen. Eine Umkehrung der Stromrichtung bewirkt dadurch auch eine Umkehrung der Rotationsrichtung.

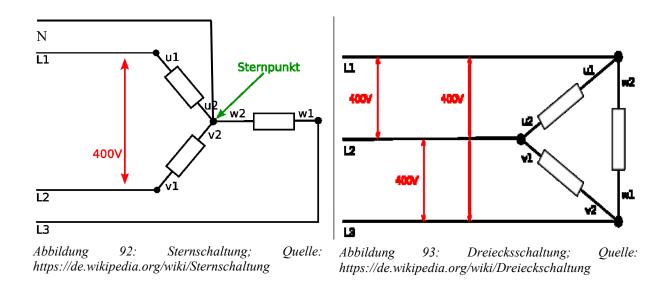
In diesem Experiment wurden die Spulen gemäß einer sogenannten "Sternschaltung" geschalten bzw. verbunden, die in Abbildung 92 dargestellt ist. Die Spulen werden in Reihe und zusätzlich in einem Mittelpunkt, der als Sternpunkt bezeichnet wird, zusammengeschlossen. Hier kann ein Neutralleiter (N) angeschlossen werden. Diese Schaltung ermöglicht es, bei Belastung zwei unterschiedliche Spannungen "abzugreifen". Entweder zwischen einem der Außenleiter (L1, L2, L3) und dem Neutralleiter, oder zwischen zwei Außenleitern. Zwischen Außenleiter und Nullleiter beträgt die abzugreifende Spannung 230 Volt, zwischen zwei Außenleitern 400 Volt. Dies ergibt sich durch folgenden Zusammenhang (Verkettungsfaktor):

$$230 V \cdot \sqrt{3} = 400 V \tag{47}$$

Ein weiterer möglicher Zusammenschluss eines Drehstromsystems kann gemäß einer Dreieckschaltung erfolgen. Hier herrscht im Gegensatz zur Sternschaltung kein Sternpunkt vor, die Spulen wären hier nur in Reihe geschalten. Hier ist es also nicht möglich, unterschiedliche Spannungen abzugreifen. Man erhält hier gemäß Glg. (47) immer 400 Volt.

Zusätzlich kann bei Drehstrommotoren eine Unterteilung zwischen Asynchronmotoren und Synchronmotoren vorgenommen werden. Liegt die Drehzahl des Rotors unter der des Drehfeldes, wird der Motor als Asynchronmotor bezeichnet. Ist der Rotor aber selbst magnetisch, so sind Drehzahl des Rotors und des Drehfeldes ident. Man spricht dann von einem

Synchronmotor. In unserem Experiment liegt keine Synchronisation zwischen Drehzahl des Rotors und Drehfrequenz des Feldes dar, weshalb diese Anordnung als "Drehstrom-Asynchronmotor" zu bezeichnen ist. (vgl. Demtröder, 2013, S.151.; Giancoli, 2010, S. 1045f.; Wikipedia: Sternschaltung, kein Datum; Wikipedia: Dreiecksschaltung, kein Datum)



6.10 Wunderkreisel

Material:

 Aufbau des "Top – Secret" Kreisels: Kreisel inklusive zylinderförmige Basis (mit versteckter Batterie, Spule und Transistor)

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/611pX1-VM7c



Abbildung 94: Wunderkreisel; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Dieser, im Handel mit dem Namen "Top Secret - Kreisel" oder "Wunderkreisel" zu erwerbende Kreisel mit zylinderförmiger Basis, ist ein hervorragender Versuch um SchülerInnen zum Nachdenken anzuregen. Äußerlich sieht man nur den kleinen Kreisel und seine schwarze Basis. Dreht man den Kreisel aber nun auf der Basis an, scheint er Kreiselbewegungen zu vollziehen, ohne dabei jemals in Stillstand zu geraten. Diese "Verletzung" des Energieerhaltungssatzes wird durch ein kleines Versteck in der zylinderförmigen Basis kompensiert (siehe Physikalische Erklärung).

Die zylinderförmige Basis versteckt das Geheimnis des sich ewig drehenden "Wunderkreisels". Unter der Basis befindet sich nämlich eine Art "Antriebsmechanismus", bestehend aus einer Batterie als Energiequelle, einer Spule mit Eisenkern und einem Transistor (siehe Abbildung 96). Der Kreisel selbst weist in horizontaler Richtung eine Magnetisierung wie ein Dipol auf. Dreht man nun den Kreisel auf der Basis an, läuft ein Pol des Kreisels über die darunter liegende Spule inklusive Eisenkern. Diese induziert einen Spannungsimpuls, welcher die Batterie über den Transistor, der als elektronischer Schalter wirkt, kurzschaltet. Umgekehrt wird wiederum in der Spule ein Magnetfeld induziert, das den Pol des Kreisels abstößt und ihm sozusagen einen leichten Anstoß gibt. Neben diesem "Antriebsmechanismus" muss die Basis auch eine leicht gewölbte Auflagefläche besitzen, sodass der Kreisel immer wieder in das Zentrum gelenkt wird und der Kontakt zur Energiequelle ständig gegeben ist. Auf der Auflagefläche ist ebenso eine kleine Erhöhung vorhanden, die mit dem Auge kaum sichtbar ist. Diese veranlasst den Kreisel, immer neue zufällige Bahnen einzuschlagen. So wird eine natürliche Kreiselbewegung garantiert (siehe Abbildung 95).

(vgl. Ucke C., Schlichting H.J., 2014)

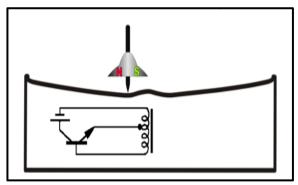


Abbildung 95: Darstellung der gewölbten Auflagefläche; Quelle:http://www.ucke.de/christian/physik/ftp/lecture s/Ewiger Kreisel.pdf

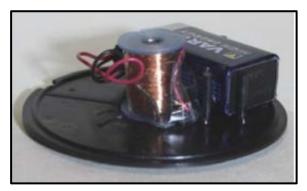


Abbildung 96: "geöffneter" Wunderkreisel; Quelle:http://www.ucke.de/christian/physik/ftp/lectu res/Ewiger_Kreisel.pdf

7 Optik

7.1 Farbkreisel

Material:

- Bohrmaschine
- Farbkreisel (Platte mit unterschiedlichen Farben)
- Metallstab

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/C1Y-nZkgNy8

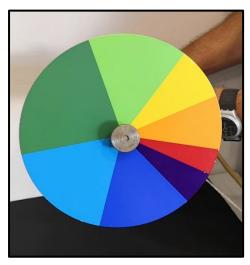


Abbildung 97: Farben des Kreisels; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

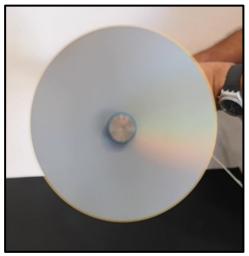


Abbildung 98: Rotierender, in grau erscheinender Kreisel; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Der Farbkreisel, dies ist eine Platte bestehend aus der in Abbildung 97 ersichtlichen Farbenanordnung, wird mithilfe eines Metallstabes an der Bohrmaschine befestigt und in Rotation versetzt. Anstatt einer Platte kann auch ein etwas kräftigeres Papier verwendet werden. Durch unterschiedliche Rotationszahlen können unterschiedliche Farbeindrücke wahrgenommen werden. Bei sehr geringer Drehzahl sieht man die ursprüngliche

Farbmischung. Erreicht man nun einen genügend große Rotationsgeschwindigkeit, kann unser Auge die ursprünglichen Farben nicht mehr wahrnehmen. Der Farbkreisel erscheint weiß bzw. in einem hellen Grau.

Physikalische Erklärung:

Ab einer bestimmten Rotationsgeschwindigkeit kann unser Auge die einzelnen Farben des Kreisels nicht mehr wahrnehmen (Rotationsgeschwindigkeit übersteigt Trägheit der Augen). Deshalb addieren die Augen die einzelnen Farben und es kommt zur Mischung der Farben. Da unser Farbkreisel alle Bereiche des RGB – Farbspektrums abdeckt, entsteht laut dem Prinzip der additiven Farbmischung die Farbe weiß. In der Praxis erscheint der Kreisel jedoch nicht weiß, sondern eher in einem hellen Grau.

7.2 Lichtmühle

Material:

- Lichtmühle
- Lichtquelle

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/jhYkQtmVwKY

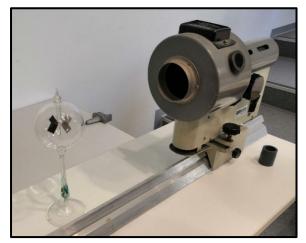


Abbildung 99: Versuchsaufbau; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

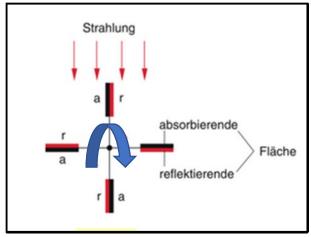


Abbildung 100: Rotationsrichtung der Lichtmühle; Quelle: Demtröder, 2013, S.199. (der blaue Pfeil wurde persönlich ergänzt!)

Versuchsaufbau:

Eine Lichtmühle besteht aus einem Glasgefäß, in dessen Innerem sich vier frei drehbare Metallplättchen befinden, die auf einer Seite jeweils eine geschwärzte, absorbierende Fläche und auf der anderen Seite eine silbrige, reflektierende Fläche aufweisen. Wird die Lichtmühle mit Licht bestrahlt, ist eine Rotation der Metallplättchen zu beobachten. Die Rotationsrichtung ist dabei gemäß Abbildung 100 eindeutig.

Dieses Experiment kann nicht nur der physikalischen Kategorie der Optik, sondern prinzipiell auch der Wärmelehre sowie der Mechanik zugeordnet werden. Im Glasgefäß herrscht ein starker Unterdruck von ca. 5 Pascal (Vergleich Luftdruck: ca. 101300 Pascal). Man kann deshalb annehmen, dass die Moleküle sehr locker angeordnet sind und der Abstand zwischen zwei Molekülen viel größer als deren Durchmesser ist. Auch die Reibung am Lager kann dadurch vernachlässigt werden. Bestrahlt man die Vorrichtung mit Licht, so absorbieren die schwarzen Flächen viel mehr Wärme als die silbrigen Flächen. Die Gasmoleküle auf den geschwärzten Seiten weisen demnach eine schnellere thermische Bewegung auf. Wenn sich Gasmoleküle nun von den Metallplättchen lösen, weisen diese einen gewissen Impuls auf. Durch die größere thermische Bewegung an den geschwärzten Seiten der Metallplättchen üben diese einen stärkeren Impuls auf das Metallplättchen auf, wenn sie sich von den Metallplättchen lösen, weshalb sich die Vorrichtung aufgrund der resultierenden Rückstoßkraft und einem damit ausgelösten Nettodrehmoment als Ganzes zu drehen beginnt. Dies erklärt auch, warum die Vorrichtung die Rotationsrichtung gemäß Abbildung 100 aufweist. Abbildung 101 illustriert diesen Impuls (rote/blaue Pfeile) und der daraus resultierenden Rückstoßkraft auf die Metallplättchen (gelbe/ orange Pfeile).

Würde die Lichtmühle nicht teilevakuiert, sondern totalem Vakuum ausgesetzt sein, müsste sich die Drehrichtung eigentlich umkehren. Die reflektierenden Flächen sind grundsätzlich einem größeren Strahlungsdruck ausgesetzt. Genauer gesagt ist der Strahlungsdruck bei totaler Reflexion doppelt so groß als bei totaler Absorption. Die reflektierenden Flächen würden somit aufgrund des größeren Strahlungsdruckes und der damit größeren Impulsübertragung einfach weggedrückt werden. In diesem Experiment überwiegt jedoch der Temperatureffekt der Gasmoleküle und somit rotiert die Lichtmühle in die andere Richtung. (vgl. Demtröder, 2013, S.199)

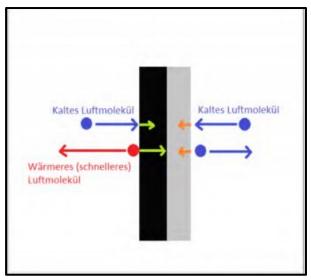


Abbildung 101: Impuls der Moleküle bzw. Rückstoß auf die Metallplättchen; Quelle: https://www.schuelerkonferenz.edu.tum.de/fileadmin/w 00brm/www/Seminararbeiten_2018/Muellner_Anja_W _Seminararbeit_www.pdf

7.3 Messung der Lichtgeschwindigkeit mit der Drehspiegelmethode nach Foucalt

Material:

- Blende
- Experimentiermotor
- Hohlspiegel
- Linse
- Fotoplatte
- Spiegel (beidseitig)

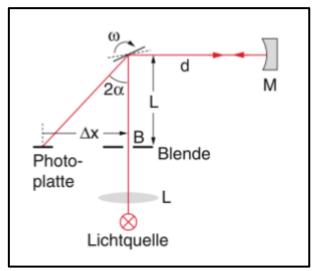


Abbildung 102: Skizze zum Versuchsaufbau; Quelle: Demtröder, 2013, S.202.

Versuchsaufbau:

Dieses Experiment, welches bereits 1850 durch den französischen Physiker Léon Foucalt durchgeführt wurde, soll den Wert der Lichtgeschwindigkeit von ca. 300 000 000 m/s mit einem rotierenden Drehspiegel, der von einem Experimentiermotor angetrieben wird, nachweisen. Gemäß Abbildung 102 werden die von einer Lichtquelle erzeugte Lichtstrahlen durch eine Linse L und eine Blende B parallel ausgerichtet (Kollimation). Der Lichtstrahl trifft dann über einen rotierenden Spiegel auf einen Hohlspiegel M, der den Lichtstrahl reflektiert und wieder zum rotierenden Spiegel lenkt. Dieser hat sich währenddessen um einen Winkel α weitergedreht und lenkt den Lichtstrahl schlussendlich auf eine Fotoplatte. Es ist hinzuweisen, dass der Abstand d zwischen Drehspiegel und Hohlspiegel sehr groß sein muss.

Der rotierende Spiegel rotiert mit einer bestimmten bekannten Drehfrequenz $\omega = 2\pi f$ und ist durch einen Abstand d vom Hohlspiegel H entfernt. Aufgrund der Drehfrequenz von $\omega = 2\pi f$ erhält man für die Zeit einer Umdrehung des rotierenden Spiegels:

$$T_{ROT} = \frac{2\pi}{w} \tag{48}$$

Mit der Rotationsfrequenz und der "Umdrehungszeit" erhält man die Zeit, die zwischen der ersten und zweiten Reflexion des rotierenden Spiegels vergangen ist, durch:

$$T = \frac{2d}{c} = T_{ROT} \cdot \frac{\alpha}{2\pi} = \frac{\alpha}{\omega} \tag{49}$$

Nun gelangt der zweimal reflektierte Lichtstrahl auf die Fotoplatte. Der Lichtstrahl weist dabei einen Abstand Δx zwischen Blende und Fotoplatte auf.

Mit

$$\Delta x = L \cdot \tan 2\alpha \approx 2L \cdot \alpha \tag{50}$$

kann man den Wert der Lichtgeschwindigkeit nun auf diesen Abstand Δx und der Rotationsfrequenz ω zurückführen:

$$c = 2d \cdot \frac{w}{\alpha} = 4d \cdot \frac{\omega L}{\Delta x} \tag{51}$$

(vgl. Demtröder, 2013, S.201f.)

7.4 Optische Täuschung: Benham – Scheibe

Material:

• Benham Scheibe

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/WIwE1qlcl0A



Abbildung 103: Ruhende Benham Scheibe; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz



Abbildung 104: Rotierende Benham Scheibe, die Farbe(n) sind am Bild nur kaum zu erkennen. Im Video kann man diese aber beobachten; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz



Abbildung 105: Unterseite der Benham Scheibe, eine eindeutige physikalische Erklärung soll es bis heute nicht geben; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Diese Optische Illusion der sogenannten "Benham Scheibe "oder "Benham – Disk" wurde bereits 1894 von C.E. Benham entdeckt und beschrieben. Dreht man die Scheibe an, die aus einem bestimmten Muster aus schwarzen und weißen Farben (siehe Abbildung 103) besteht, entstehen Farben auf der der sich rotierenden Scheibe. Ebenso erkennt man, dass eine Variation der Rotationsgeschwindigkeit zu einer Änderung der sich ergebenden Farbanteile führt.

Physikalische Erklärung:

Eine eindeutige physikalische Erklärung, warum Farben auf der Benham- Scheibe wahrgenommen werden, soll es bis heute nicht geben. Jedoch sollen nun zwei Theorien skizziert werden: Eine Theorie basiert auf der Netzhaut des Auges. Diese weist zwei Arten von lichtempfindlichen Rezeptorzellen, nämlich die Zapfen und Stäbchen auf. Stäbchen sind wichtig für das Sehen bei schlechten Lichtverhältnissen. Zapfen sind wichtig für das Farbsehen und für das Sehen bei hellem Licht. Es gibt drei Arten von Zapfen, von denen jeder für eine bestimmte Lichtwellenlänge am empfindlichsten ist (rot, grün, blau). Diese Zapfentypen sollen für die wahrnehmbaren Farben verantwortlich sein, indem durch die unterschiedlichen Reaktionszeiten dieser Zapfen, diese bei der Beobachtung der Drehung der Scheibe unterschiedlich lang aktiviert bleiben. Das Holz, sowie die weiße Farbe des Tisches, aktivieren alle drei Zapfentypen, während die schwarze Farbe auf der Benhamscheibe wiederum eine Deaktivierung der Zapfentypen auslöst. Das abwechselnde Aktivieren und Deaktivieren der Zapfentypen führt in Kombination mit den unterschiedlichen Reaktionszeiten zur Wahrnehmung von Farben. Eine andere Theorie basiert ebenfalls auf der Funktion der Netzhaut des Auges, begründet die Farbwahrnehmung aber anders: Sie besagt, dass die auf der Scheibe entstehenden Farben auf Veränderungen der Netzhaut und anderer Teile des Auges zurückzuführen sind. Beispielsweise können die sich drehenden Scheiben benachbarte Bereiche der Retina unterschiedlich aktivieren. Die schwarzen und weißen Bereiche der Scheibe stimulieren somit unterschiedliche Teile der Netzhaut. Diese abwechselnde Reaktion kann zu Interaktionen innerhalb des Nervensystems führen, die Farben erzeugen. Es ist jedoch zu betonen, dass keine der beiden Theorien eine klare Antwort auf die Frage liefert, weshalb unser Auge die Farbeindrücke wahrnimmt. Beide Theorien liefern nur mögliche Interpretationen. (vgl. Chudler: Benham's Disk, kein Datum)

7.5 Stehende Bilder mit einem Farbkreisel und einem Stroboskop

Material:

- Bohrmaschine
- Farbkreisel
- Metallstab
- Stroboskop

Link und QR- Code zum Video:



https://youtu.be/S3bIAaQ0AjY



Abbildung 106: Farbkreisel mit Stroboskop beleuchtet; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz

Versuchsaufbau:

Ein Stroboskop ist ein Gerät, das in regelmäßigen zeitlichen Abständen Lichtblitze aussendet. In diesem Experiment wird es bei dunkler Umgebung auf einen rotierenden Farbkreisel gerichtet (Montierung des Farbkreisels siehe Experiment 7.1 "Farbkreisel"). Durch die Lichtblitze gelingt es, in bestimmten Zeitintervallen stehende Bilder bzw. langsame vor- und rückwärtsbewegende Perioden des Farbkreisels zu erzeugen.

Das Experiment kann der Kategorie der Optischen Täuschung zugeordnet werden. Es beruht auf dem sogenannten stroboskopischen Effekt, der die scheinbar verlangsamte oder umgekehrte Abfolge von periodischen Bewegungen (z.B. schnelle Bewegungen) in bestimmten Zeitintervallen beschreibt. Unser Auge kann ab einer bestimmten Bildfrequenz (Anzahl von Bildern pro Sekunde) die Bilder nicht mehr einzeln wahrnehmen, sondern "spielt" sie als kontinuierlichen Prozess ab. Werden nun mit dem Stroboskop Lichtblitze mit einer Frequenz ausgesendet, die einem ganzzahligen Vielfachen der Rotationsfrequenz entsprechen, nimmt unser Auge keine Abfolge von Bewegungen, sondern ein stehendes Bild wahr. Vermindert man die Rotationsfrequenz des Farbkreisels nun ein bisschen, wandelt sich das stehende Bild wieder in eine langsame Vorwärtsbewegung um. Erhöht man die Frequenz, nimmt unser Auge eine sich rückwärtsbewegende Bewegung wahr.

(vgl. Higatsberger, 1977, S. 25f.; Spektrum: Stroboskopischer Effekt, 1999)

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Selbstgebautes Anemometer	5
Abbildung 2: Digitales Messgerät (Anemometer)	5
Abbildung 3: Ellipsograph aus Holz	7
Abbildung 4: Mathematische Darstellung (Ellipsograph)	8
Abbildung 5: Geschwindigkeit einer Gewehrkugel: Zwei Papierscheiben (Seitenansicht)	9
Abbildung 6: Geschwindigkeit einer Gewehrkugel: Metallstab als Winkelmesser	9
Abbildung 7: Skizze (Geschwindigkeit einer Gewehrkugel)	10
Abbildung 8: Ausgestreckte Arme: großes Trägheitsmoment/geringe	
Rotationsgeschwindigkeit.	11
Abbildung 9: Rotierende Fahrradfelge mit horizontaler Drehachse- keine Rotation des	
Drehstuhls	13
Abbildung 10: Rotierende Fahrradfelge mit vertikaler Drehachse – Rotation des Drehstuh	ıls
in entgegengesetzter Richtung.	13
Abbildung 11: Freie Drehachsen: Zylindrischer Stab	16
Abbildung 12: Freie Drehachsen: Scheibe	16
Abbildung 13: Freie Drehachsen: Ring	16
Abbildung 14: Freie Drehachsen: Kette	16
Abbildung 15: Funkenregen	18
Abbildung 16: Keltischer Wackelstein: Perspektive von oben	20
Abbildung 17: Keltischer Wackelstein: seitliche Perspektive	20
Abbildung 18: Darstellung der wippenden und "kippenden" Bewegung des Wackelsteins	um
seine Achsen	21
Abbildung 19: Querschnitt des Wackelsteins während Wackelbewegung	22
Abbildung 20: Resultierende Kraft F und folgende Richtungsumkehr des Wackelsteins	23
Abbildung 21: Kugel im Cognacglas (Ausgangsstellung)	24
Abbildung 22: Skizze zur Kräfteverteilung.	25
Abbildung 23: Spannen des Papierausschnittes	26
Abbildung 24: "Abschuss" des Papierausschnittes	26
Abbildung 25: Illustrierung des Magnuseffekts: F stellt die Querkraft dar, die auf einen	
umströmten Körper wirkt	27
Abbildung 26: Maxwell'sches Rad	28
Abbildung 27: Angepasste Papierscheibe	30
Abbildung 28: Papier "sägt" Kreide durch	30

Abbildung 29: Ausgangsstellung des Experiments (Erdabflachung)	32
Abbildung 30: Demonstrierung der Abflachung	32
Abbildung 31: Pfirsich i Sodawasser	34
Abbildung 32: Skizze zur Physikalischen Erklärung: anstatt eines Pfirsichs ist hier ein	e Kiwi
dargestellt	35
Abbildung 33: Plattenspieler mit Münzen	36
Abbildung 34: Tangentiale Geschwindigkeit der Münze entlang der Kreisbahn	39
Abbildung 35: Zentripetalkraft als Ursache für Kreisbahn der Münze	39
Abbildung 36: "Schleudergerät"	40
Abbildung 37: Schleudern der Kugel auf einer Kreisbahn	40
Abbildung 38: "Spinning Clown"	43
Abbildung 39: LEDs in Rotation	43
Abbildung 40: Druckausübung auf den Pfropfen lässt den Taucher sinken;	45
Abbildung 41: Variante eines Cartesischen Tauchers, den man im Internet erwerben k	ann45
Abbildung 42: Flaschentornado	47
Abbildung 43: Selbstgebautes Wasserrad	49
Abbildung 44: Darstellung der Kräfteverteilung auf den Trinkhalm.	50
Abbildung 45: Parabolische Oberflächenausbildung	51
Abbildung 46: Nahaufnahme (Rotierende Flüssigkeit)	51
Abbildung 47: Skizze zur parabolischen Oberflächenausbildung der rotierenden Flüss	igkeit 53
Abbildung 48: Üblicher Wasserzähler in einem Haushalt	54
Abbildung 49: Nassläufer	56
Abbildung 50: Trockenläufer	56
Abbildung 51: Einstrahlflügelradzähler	56
Abbildung 52: Mehrstrahlflügelradzähler	56
Abbildung 53: Dopplereffekt mit einem Plastikrohr	57
Abbildung 54: Frequenzänderung, Der kleine Kreis stellt die Schallquelle dar	59
Abbildung 55: Anordnung der Löcher (Tonerzeugung mit Scheibe)	60
Abbildung 56: Tonerzeugung aufgrund Lochanordnung	60
Abbildung 57: Skizze zum Experiment (Tonerzeugung mit Scheibe)	62
Abbildung 58: Hui Hui Rädchen	63
Abbildung 59: Angepasster Joghurtbecher	65
Abbildung 60: Tonerzeugung mit Joghurtbecher	65
Abbildung 61: Wilberforce Pendel	67

Abbildung 62; Materialien für den Feuertornado	69
Abbildung 63: Feuertornado: Durchführung	70
Abbildung 64: Kerzenspiel	71
Abbildung 65: Ausrichtung eines Blattes und Impulserhaltung (Kerzenspiel)	72
Abbildung 66: Papierturbine	73
Abbildung 67: Papierturbine – Perspektive von unten	73
Abbildung 68: Thermobile in Wasser	75
Abbildung 69: Wachsender Messingdraht	77
Abbildung 70: Nahaufnahme des Zeigers	77
Abbildung 71: Der Luftballon "schleppt" die Dose ab	79
Abbildung 72:Veranschaulichung der Influenz	80
Abbildung 73: Arago'sche Scheibe	81
Abbildung 74: Barlow'sches Rad und Netzgeräte inklusive Verbindungskabeln	83
Abbildung 75: Prinzip des Barlow'schen Rades.	84
Abbildung 76: Selbstgebauter Elektromotor	85
Abbildung 77: Selbstgewickelter Kupferdraht	85
Abbildung 78: Skizze zum Experiment: Kupferschleife befindet sich in einem Magnetfe	eld und
erfährt eine Kraft	87
Abbildung 79: Aufbau eines Kommutators	87
Abbildung 80: Elektrischer Wind	88
Abbildung 81: Abhängigkeit der Feldliniendichte bezüglich Radius der Punktladung	90
Abbildung 82: Influenzmaschine	91
Abbildung 83: Skizze einer Influenzmaschine	92
Abbildung 84: Funktionsprinzip einer Influenzmaschine.	92
Abbildung 85: Lichtquelle und Solarzelle	93
Abbildung 86: Verunreinigung bzw. Dotierung von Silizium mit Arsen/Bor	95
Abbildung 87: Aufbau einer Solarzelle	95
Abbildung 88: Van de Graaff- Generator	96
Abbildung 89; Skizze und Funktionsweise des Generators.	97
Abbildung 90: Form des Metallbügels	97
Abbildung 91: Drehstrommotorz	98
Abbildung 92: Sternschaltung	100
Abbildung 93: Dreiecksschaltung	100
Abbildung 94: Wunderkreisel	101

Abbildung 95: Darstellung der gewölbten Auflagefläche
Abbildung 96: "geöffneter" Wunderkreisel
Abbildung 97: Farben des Kreisels
Abbildung 98: Rotierender, in grau erscheinender Kreisel
Abbildung 99: Lichtmühle und Lichtquelle
Abbildung 100: Rotationsrichtung der Lichtmühle
Abbildung 101: Impuls der Moleküle bzw. Rückstoßkraft auf die Metallplättchen107
Abbildung 102: Messung der Lichtgeschwindigkeit mit der Drehspiegelmethode
Abbildung 103: Ruhende Benham Scheibe
Abbildung 104: Rotierende Benham Schheibe
Abbildung 105: Unterseite der Benham Scheibe
Abbildung 106: Farbkreisel mit Stroboskop beleuchtet; eigenes Bild; Apparatur: TU Graz 112

9 Literaturverzeichnis

- Apolin, M. (2008). Big Bang (Physik 7). Wien: öbv.
- Auer, D. (2005). Physikalische Freihandversuche aus Optik (Diplomarbeit). Graz
- Bormann M., Krämer K. (1982). Erarbeitung physikalischer Größen und Gesetze im Physikunterricht der Sekundarstufe I unter Einsatz von Schülerexperimenten. Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Case, W., Jalal, S. (2014). The rattleback revisited, in: American Journal of Physics 82/7.
 S. 654-658.
- Chudler (kein Datum). Benham's Disk, unter:
 https://faculty.washington.edu/chudler/benham.html (Abgerufen am: 22.12.2019)
- Demtröder, Wolfgang (2013). Experimentalphysik 2 Elektrizität und Optik. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Demtröder, Wolfgang (2018). Experimentalphysik 1 Mechanik und Wärme. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Giancoli, D.C. (2010). Physik Lehr- und Übungsbuch. München (u.a.): Pearson Studium.
- Higatsberger, M. J. (1977). Physik in 700 Experimenten. Frankfurt am Main: Blick in die Welt.
- Hilscher, H., Berthold, C., Christ, D., Braam G., Haubrich J., Herfert M., Hilscher H., Kraus J., Möller C. (2004). Physikalische Freihandexperimente. Köln: Aulis Verlag.
- Kids and Sciences (2009). Wie funktioniert eine Wasseruhr?, unter: https://www.kidsandscience.de/wiefunktionierts/detailansicht/datum/2009/11/20/wiefunktioniert-einewasseruhr.html (Abgerufen am: 22. 12.2019).
- Leifiphysik (kein Datum). Abflachung der Erde, unter: https://www.leifiphysik.de/mechanik/kreisbewegung/versuche/abflachung-der-erde (Abgerufen am: 06.01.2020).
- Leifiphysik (kein Datum). Geschwindigkeit einer Gewehrkugel, unter: unter: https://www.leifiphysik.de/mechanik/kreisbewegung/aufgabe/geschwindigkeit-einer-gewehrkugel (Abgerufen am: 22. 12. 2019).
- Leifiphysik (kein Datum). Rotierendes Wassergefäß, unter: https://www.leifiphysik.de/mechanik/kreisbewegung/versuche/rotierendes-wassergefaess (Abgerufen am 12.01.2020).
- Leitner, S. (2017). Demonstrations experimente zur Levitation (Diplomarbeit). Graz.

- LP- Uni Göttingen (kein Datum). Das Barlow- Rad, unter: https://lp.uni-goettingen.de/get/text/328 (Abgerufen am 15.01. 2019).
- LP- Uni Göttingen (kein Datum). Die Influenzmaschine, unter: https://lp.unigoettingen.de/get/text/2357 (Abgerufen am 22.12.2019).
- LP- Uni Göttingen (kein Datum). Drehstuhlexperimente zur Erhaltung des Drehimpulses, unter: https://lp.uni-goettingen.de/get/text/1195 (Abgerufen am: 06.01.2020).
- Metherm informiert (kein Datum). Funktion von Wasserzählern, unter: http://www.kunststofflager-verden.de/u/funktion-von-wasserzaehlern.pdf (Abgerufen am: 10.01.2020).
- Physics Fair Experiments (kein Datum). Thermobile, unter: http://outreach-old.web.cern.ch/outreach-old/public/nl/physics_fair/Exp54.html (Abgerufen am 13.01.2020).
- Physikanten (kein Datum). Feuertornado, unter: http://www.physikanten.de/experimente/feuertornado (Abgerufen am 02.01.2020).
- Raith, W. (1999). Lehrbuch der Experimentalphysik: Bergmann- Schäfer. Elektromagnetismus (Bd. 2). New York: de Gruyter.
- Reddy C. (2019). Experimente mit Wasser (Diplomarbeit), Graz.
- RIS (2019). Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne, unter: https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/10008568/Lehrpl%c3%a4ne% 20%e2%80%93%20allgemeinbildende%20h%c3%b6here%20Schulen%2c%20Fassung% 20vom%2027.12.2019.pdf (Abgerufen am 27.12.2019).
- Schlichting, H.J., Backhaus U. (1988). Zur Physik der Hui- Maschine, in: Physik und Didaktik 16/3. S. 238-243, verfügbar unter: https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/hui_maschine.pdf.
- Spektrum (1998). Aragoscher Versuch, unter:
 https://www.spektrum.de/lexikon/physik/aragoscher-versuch/717 (Abgerufen am: 22.12.2019).
- Spektrum (1999). Stroboskopischer Effekt, unter: https://www.spektrum.de/lexikon/optik/stroboskopischer-effekt/3291 (Abgerufen am 12.01.2020).
- Sprockhoff, G., Brunstein, W. (1978). Physikalische Schulversuche Elektrizitätslehre 1.
 Köln: Aulis Verlag

- Sprockhoff, G., Schollmeyer, G. (1980). Physikalische Schulversuche Wärmelehre. Köln: Aulis Verlag.
- Steinwender, B. (2012). Physikalische Experimente mit Flaschen (Diplomarbeit). Graz.
- Ucke C., Schlichting H.J. (2014). Und ewig dreht sich der Kreisel, in: Physik in unserer Zeit 46. S. 284-286, verfügbar unter: http://www.ucke.de/christian/physik/ftp/lectures/Ewiger Kreisel.pdf.
- Wiesner H., Schecker H., Hopf M. (2017). Physikdidaktik kompakt. Seelze: Aulis Verlag.
- Wiespeiner, K. (2006). Physikalische Versuche zu Schwingungen und Wellen (Diplomarbeit). Graz.
- Wikipedia (kein Datum). Anemometer, unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Anemometer (abgerufen am: 22. Dezember 2019)
- Wikipedia (kein Datum). Dreiecksschaltung, unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Dreieckschaltung (Abgerufen am 02.02.2020).
- Wikipedia (kein Datum). Spitzenentladung, unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Spitzenentladung (Abgerufen am: 12.01.2020).
- Wikipedia (kein Datum). Sternschaltung, unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Sternschaltung (Abgerufen am: 02.02.2020).
- Wikipedia (kein Datum). Trammel of Archimedes, unter: https://en.wikipedia.org/wiki/Trammel of Archimedes (Abgerufen am 29.12.2019)
- Wikipedia (kein Datum). Wilberforce Pendel, unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Wilberforce-Pendel (Abgerufen am 15.01.2020).
- Wilke, H.J., Krug, W., Oehme, W. (1999). Physikalische Schulexperimente Band 2 Optik/
 Kernphysik/Elektrizitätslehre. Berlin: Volk und Wissen Verlag.
- Wilke, H.J., Krug, W., Oehme, W. (2002). Physikalische Schulexperimente Band 3
 Elektrizitätslehre/ Optik/ Mechanik/ Thermodynamik/ Kernphysik/ Relativitätstheorie.
 Berlin: Volk und Wissen Verlag.
- Woodford, C. (2019). Record Players and Phonographs, unter: https://www.explainthatstuff.com/record-players.html (Abgerufen am: 15.01.2020).