47 Physikalische Experimente aus der Federschachtel

Wie man Schreibutensilien für SchülerInnenexperimente nutzen kann

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines Magisters der Naturwissenschaften

an der Karl-Franzens-Universität Graz

> vorgelegt von Georg NEUREITER

> > Begutachter:

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher

Technische Universität Graz Institut für Experimentalphysik

Graz, 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 ent-

spricht der eingereichten elektronischen Version.

Datum: 29.6.2020

Unterschrift:

Danksagung

Ich bedanke mich sehr herzlich bei meinem Betreuer Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher, der mir von Anfang an mit Geduld, Verständnis und umfassendem Wissen zur Seite stand, meinen Ideen Raum und Zeit zur Entwicklung gab und immer erreichbar war.

Diese Arbeit entstand zur richtigen Zeit am richtigen Ort. Rückblickend betrachtet, wären die Dinge, die ich erreicht habe nur durch Kühnheit vorhersehbar gewesen. Es ist ein glücklicher Zufall, von den wunderbarsten Menschen umgeben zu sein, die mir den nötigen Rückhalt durch ihre Wertschätzung, Hilfsbereitschaft und Liebe geben.

Dadurch, dass sie mich als den Menschen sehen, der ich bin und meine Pläne niemals in Frage stellen, darf ich es mir erlauben, mein inneres Kind weiterhin die Welt mit offenen Augen erforschen zu lassen. Ich bedanke mich von ganzem Herzen bei:

Meiner Familie, die mich unermüdlich auf den von mir gewählten Wegen in jeglicher Form stets unterstützt.

Meinen FreundInnen, die auch dann verstehen was ich sage, wenn mir dies selbst nicht mehr gelingt.

Diese Arbeit ist meiner Mama gewidmet, die auch einmal ein Semester Physik studierte und mir in allen Bereichen des Lebens ein Vorbild war und immer bleiben wird.

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit handelt von Experimenten mit Schreibutensilien, sprich Gegenständen, die auch im Schulalltag in ständigem Gebrauch sind. Sie soll dabei helfen, einen Teil des klassischen Schulstoffs unterstützend zu veranschaulichen. Dabei stehen größtenteils ungefährliche Freihandexperimente für SchülerInnen im Vordergrund, die sich quer durch die Bank über die Themengebiete: Optik, Elektrizität, Mechanik, Wärmelehre, Auftrieb, Aerodynamik und Akustik erstrecken.

Zu Beginn der Arbeit findet sich ein kurzer Teil, der Bezug auf die fachdidaktische Legitimität von Experimenten im Unterricht nimmt. Darauf folgt ein Kapitel, das sich auf die markanten Eigenschaften der verwendeten Materialien bezieht. Der Hauptteil widmet sich schließlich den Experimenten, wobei jedes derart aufbereitet sein soll, dass es von einer breiten LeserInnenschaft nachvollzogen werden kann. Dies beinhaltet eine Versuchsbeschreibung, die Auflistung aller nötigen Materialien, die Durchführung und eine auf wissenschaftliche Recherche gestützte Erklärung. Des Weiteren sind Anmerkungen und Ideen zum Ausbau der Experimente angeführt.

Abstract

This thesis explores experiments with various types of writing tools, because writing utensils can be found in every classroom and are also low in price. The main objective of this thesis is to support the didactic method of using experiments for educational purposes, and it will serve as a well-researched source for anybody with interest in the topic. The thesis is split into the following topics: optics, electricity, mechanics, thermodynamics, uplift, aerodynamics, and acoustics.

To begin, the paper discusses legitimacy and purpose of experiments in education. The next chapter is about the characteristics of the materials used, which is followed by the main part. Every experiment is displayed together with its corresponding description, a list of required substances, and what the expected results should be. This will be accompanied by an explanation that is supported by scientific research. Finally, references are provided that explain how to extend the experiments if needed.

Inhaltsverzeichnis

| 1 | Einleitur | ng | 1 |
|---|---------------|---|----|
| 2 | Vorberei | itendes | 2 |
| | 2.1 Fach | ndidaktische Überlegungen | 2 |
| | 2.2 Auft | oau und Hinweise | 5 |
| 3 | Material | ien | 5 |
| | 3.1 Papi | er | 6 |
| | 3.2 Kleb | ostoffe und Klebeband | 8 |
| | 3.2.1 | Aufbau und Funktion | 9 |
| | 3.2.2 | Klebstoff | 9 |
| | 3.2.3 | Klebestift | 10 |
| | 3.2.4 | Klebeband | 10 |
| | 3.2.5 | Cyanacrylatklebstoff (Sekundenkleber) | 10 |
| | 3.3 Gum | nmiringe | 10 |
| 4 | 4 Experimente | | |
| | 4.1 Opti | k | 13 |
| | 4.1.1 | Experiment 1: Interferenz am Doppelspalt | 13 |
| | 4.1.2 | Experiment 2: Die Lochkamera | 17 |
| | 4.1.3 | Experiment 3: Papierblende #1 | 19 |
| | 4.1.4 | Experiment 4: Papierblende #2 - Hornhautfehler erkennen | 21 |
| | 4.1.5 | Experiment 5: Papierblende #3: Die Sonne an der Wand | 23 |
| | 4.1.6 | Experiment 6: Stift im Wasserglas | 24 |
| | 4.2 Elek | trizität | 27 |
| | 4.2.1 | Experiment 7: Graphit-Potentiometer | 27 |
| | 4.2.2 | Experiment 8: Elektrostatik mit Lineal und Papier | 29 |
| | 4.3 Mec | hanik | 32 |
| | 4.3.1 | Experiment 9: Brückenstabilität mit Papier | 32 |

| 4.3.2 | Experiment 10: Der "stabilste" Papierwürfel der Welt | 35 |
|----------|--|------|
| 4.3.3 | Experiment 11: Schwerpunktmessung | 39 |
| 4.3.4 | Experiment 12: Trägheit von Büchern | 41 |
| 4.3.5 | Experiment 13: Büroklammerkreisel (Sakai-Kreisel) | 42 |
| 4.3.6 | Experiment 14: Papier 8 x falten | 45 |
| 4.3.7 | Experiment 15: Papier zerreißen | 47 |
| 4.3.8 | Experiment 16: Drehimpulserhaltung mit BIC-Kugelschreiber | 49 |
| 4.3.9 | Experiment 17: Der Bernoulli-Kuli | 51 |
| 4.3.10 | Experiment 18: Der Bernoulli-Venturi-Kuli | 52 |
| 4.3.11 | Experiment 19: Der rollende Bleistift | 53 |
| 4.3.12 | Experiment 20: Die Wassersäule und der Springbrunnen | 55 |
| 4.3.13 | Experiment 21: Papier an der Scheibe - Adhäsionskräfte | 56 |
| 4.4 Wär | melehre | 58 |
| 4.4.1 | Experiment 22: Die sich krümmenden Papier-Streifen | 58 |
| 4.4.2 | Experiment 23: Der "Bi"-Papierstreifen | 60 |
| 4.4.3 | Experiment 24: Ab wann verschwindet die Tinte eines Friction-Stifts? | 61 |
| 4.4.4 | Experiment 25: Die Fineliner-Kanone | 63 |
| 4.5 Auf | trieb | 66 |
| 4.5.1 | Experiment 26: Schwimmende Büroklammer | 66 |
| 4.5.2 | Experiment 27: Papierspirale über Kerze | 68 |
| 4.5.3 | Experiment 28: Auftrieb der Papierschachtel - Münzen wiegen | 70 |
| 4.5.4 | Experiment 29: Wann kippt ein Schiff aus Papier | 72 |
| 4.6 Aero | odynamik | 74 |
| 4.6.1 | Experiment 30: Ruder | 74 |
| 4.6.2 | Experiment 31: Schwerpunkt Fliegen | 77 |
| 4.6.3 | Experiment 32: Die Tragfläche | 78 |
| 4.6.4 | Experiment 33: Luftwiderstand oder wie man Papier auf über 75 | km/h |
| beschleu | ınigt | 83 |

| | 4.6.5 | Experiment 34: Magnus-Effekt | 85 |
|---|----------|---|-----|
| | 4.6.6 | Experiment 35: Der abhebende Papierstreifen, Wirbelstraße | 86 |
| | 4.6.7 | Experiment 36: Fallschirm | 88 |
| | 4.6.8 | Experiment 37: Der Papier-Schrauber | 90 |
| | 4.6.9 | Experiment 38: Fliegende Papierrolle | 93 |
| | 4.6.10 | Experiment 39: Fallendes Papier, chaotische Systeme | 95 |
| | 4.6.11 | Experiment 40: Fliegende Karten, Präzession | 98 |
| | 4.6.12 | Experiment 41: Heißluftballon aus Seidenpapier | 99 |
| 4 | .7 Aku | stik | 101 |
| | 4.7.1 | Experiment 42: Instrumente mit Gummiringen | 101 |
| | 4.7.2 | Experiment 43: Flöten und Pfeifen | 104 |
| | 4.7.3 | Experiment 44: Papier-Stimmbänder | 106 |
| | 4.7.4 | Experiment 45: Papierknaller | 107 |
| | 4.7.5 | Experiment 46: Schallkanone | 110 |
| | 4.7.6 | Experiment 47: Vortex-Kanone | 111 |
| 5 | Resüme | e | 113 |
| 6 | Literatu | rverzeichnis | 114 |
| 7 | Anhang | | 117 |

1 Einleitung

Der Entdeckergeist und die Faszination für Experimente brachten mich zur Physik und dem Studium, das mich dazu befähigt, mein Wissen an SchülerInnen weiterzugeben. So steht auch diese Arbeit im Sinne des Entdeckens, im Finden von experimentellen Zugängen zur Physik. Ich hoffe, dass meine Begeisterung ansteckt und ich diese Flamme mit genügend Material am Leben halten kann. Somit wurde die Themenfindung ein Leichtes. Es war mir wichtig, gute Gründe zu haben, warum und wofür ich schreibe - außer den obligatorischen. So kam es, dass der Gedanke reifte, ich könnte mich mit den simpelsten Materialien, die im Schulalltag auftauchten beschäftigen und versuchen, damit komplexe physikalische Vorgänge einzufangen und in Szene zu setzen. Die Schlichtheit war mir wichtig, da ich von der Idee überzeugt bin, dass Experimente gut zugänglich und auf das Wesentliche reduziert sein sollten. Es bedarf normalerweise einem Labor mit diversen Gerätschaften, Materialien und extra angefertigten Aufbauten. Die hier vorgenommenen Experimente wagen den Versuch, ohne all dem auszukommen, obgleich auch einige "Haushaltsmessgeräte" zur Hilfe genommen wurden.

Nachdem ich als zukünftiger Lehrer in der Klasse möglicherweise nicht jederzeit das nötige Material zur Verfügung haben werde, fiel mir meine Liebe zu Büroartikeln aller Art ein. Menschen verwenden diese Utensilien seit jeher und merken möglicherweise nicht, welchen Geheimnissen sie gerade auf der Spur sind, wenn sie aus Langeweile einen Stift über eine Fläche rollen lassen oder einen Gummiring quer durch den Raum schießen.

Somit begann ich, mich mit den mir verfügbaren Materialien zu beschäftigen. Der Aufbau dieser Arbeit ist demnach in themenbezogene Unterkapitel eingeteilt. Es wird ein Experiment nach dem anderen beschrieben, durchgeführt, erläutert und mit Bildern und Hinweisen aufgerollt. Somit ergibt sich eine Sammlung an Experimenten, die mir und möglicherweise auch anderen LehrerInnen in Zukunft von Nutzen sein kann. Zu jedem Thema gibt es außerdem einleitende Worte.

Bis aus wenige Ausnahmen, wurden alle Experimente von mir gebaut und fotografiert, verbessert und ggf. so modifiziert, damit man sie mit den einfachsten Materialien durchführen kann.

2 Vorbereitendes

2.1 Fachdidaktische Überlegungen

Wenn hier von Experimenten die Rede ist, sollte vielmehr von Versuchen gesprochen werden, da Experimente im wissenschaftlichen Sinn sehr viel strengere Vorgaben erfüllen müssen, um als solche ihre Gültigkeit zu erlangen.

Unter festgelegten und kontrollierbaren Rahmenbedingungen werden Beobachtungen und Messungen an physikalischen Objekten durchgeführt; Variablen werden systematisch verändert und Daten gesammelt (objektivierbare Gegenstandsbetrachtung). (Kircher 2015, 228)

Diese Objektivität fehlt in der Schule, wenn Versuchsaufbauten modifiziert, Ergebnisse "zurechtgebogen" oder Datenaufnahmeblätter zwischen Jausenbrot und Federschachtel verschwinden. Nichts desto trotz ist es wichtig, dass auf die Einbindung physikalischer Schulversuche nicht verzichtet wird, da sie eine Reihe an Funktionen erfüllen. Phänomene zu veranschaulichen oder Vorstellungen aufzubauen stehen vor den Kriterien, die eine wissenschaftliche Herangehensweise vorschreiben würde (vgl. Kirchner 2015, 228). Abb. 1 veranschaulicht die erkenntnistheoretische und didaktisch-methodische Bedeutung sowie den Beitrag zur Persönlichkeitsentwicklung von Experimenten.

Außer Frage scheint, dass das Experiment im naturwissenschaftlichen Unterricht als Teil der induktiven Methoden eine große Bedeutung hat. So kann eine Beobachtung zu einem geplanten, bestimmten Zeitpunkt geschehen. Das Experiment kann wiederholt und an die Bedingungen des Unterrichts angepasst werden. Außerdem liefern Experimente genauere Messergebnisse, als reine Sinneswahrnehmungen. (Vgl. Töpfer 1979, 128) In weiterer Folge werden die Begriffe *Experiment* und *Versuch* synonym in Gebrauch genommen.

erkenntnistheoretische Bedeutung

Sicherung der Erkenntnis

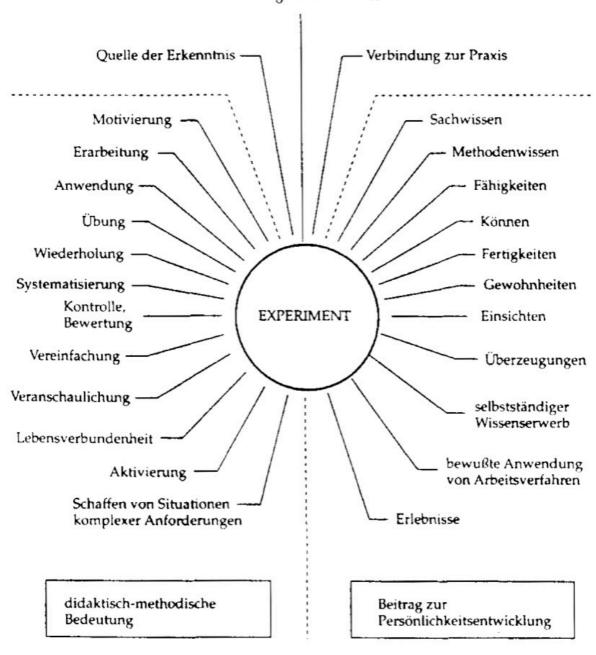


Abb. 1: Wozu dienen Experimente (Wilke 1981, S. 4 (84))

Der Schwerpunkt der didaktischen Literatur hat sich durch Studien zur Wirksamkeit von Unterrichtsexperimenten [...] gewandelt (Wiesner 2011, 113). Früher stand das Demonstrieren im Fokus, heute der Lernprozess der SchülerInnen (vgl. ebda.). Auch Duit/Häußler/Kircher merken an, dass deutlich geworden sei, dass SchülerInnen-Experimente den Demonstrationsexperimenten vorzuziehen seien, da unmittelbarer Kontakt mit dem Objekten zu intensiverem

Befassen mit der Thematik führe (vgl. Duit 1981, 165). Experimente sind mit allen Sinnen erfahrbar und prägen sich als positive Wahrnehmung ein. Der emotionale Effekt, wenn über performte Physik als Gruppe gestaunt werden kann, sollte nicht unterschätzt werden. Aus diesem Grund scheint mir ein Experimentieren mit einfachsten Materialien als sehr angebracht und sinnvoll. Aus eigener Erfahrung weiß ich, dass an manchen Schulen ein Mangel an Gerätschaften¹ herrscht und es dadurch nicht möglich ist, einzeln an Versuchen zu arbeiten. Die Einteilung der Experimente veranschaulicht folgende Grafik.

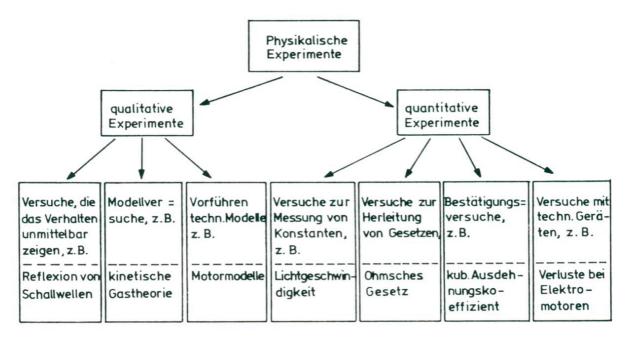


Abb. 2: Physikalische Experimente (Töpfer 1979, 129)

Im Unterricht kommen hauptsächlich qualitative Versuche zum Einsatz, bei denen Vorgänge dargestellt werden. Im Gegensatz dazu liefern messende Experimente Gesetzmäßigkeiten und Zusammenhänge zwischen den einzelnen Größen. Die zweite Art findet im Unterricht meist in sehr minimalistischem Ausmaß statt und es genügen manchmal fünf Messungen, um Rückschlüsse auf ein Gesetz ziehen zu können. (Vgl. Töpfer 1979, 128)

Im Lehrplan für Physik steht das Experiment in qualitativer und quantitativer Form wie folgt vor. "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." (Rechtsvorschrift für Lehrpläne, [21.06.2020])

4

¹ Vgl. Töpfer 1979, S. 131. [Anm.: Übersicht über das physikalische Experimentiergerät.]

Beim Gedanken an meine eigene Schulzeit, stellte ich mir die Frage, ob SchülerInnen aus Langeweile von selbst auf die Idee kommen könnten, mit den ihnen im Moment greifbaren Gegenständen zu experimentieren, ohne dass es ihnen bewusst wird. Interessanterweise zählen unter *Vorgetäuschtem Zuhören*, *Warten und Träumen* auch *Nebentätigkeiten* zu möglichen Coping-Strategien, wenn Langeweile im Unterricht auftritt. Lohrmann schreibt:

Die Strategie hat zum Ziel, sich abzulenken und die leere Zeit zu füllen. ("Wenn ich mich im Deutschunterricht langweile, spiele ich mit etwas, z.B. mit dem Federmäppehen, mit Stiften, mit dem Radiergummi, mit meinen Händen."). (Lohrmann 2009, 298)

Im weiteren Verlauf wird erwähnt, dass diese Strategie nicht lernfördernd sei, da von Lerninhalten abgewichen wird, auch wenn für den Lernenden selbst ein Zweckmäßigkeit bestehe (vgl. Lohrmann 2009, 299). Es wäre jedoch aus Sicht der Lehrperson durchaus bereichernd, könne man die kreative Energie der SchülerInnen umlenken und etwas daraus ziehen, sich eine Strategie überlegen, diese Art der Nebentätigkeiten auf Unterrichtsinhalte, z. B. im Sinne des fächerübergreifenden Unterrichts, zu lenken.

2.2 Aufbau und Hinweise

Die gebauten Experimente wurden fotografisch dokumentiert. Teilweise existieren mehrere Versionen (Varianten), um die Erfahrungen, die durch das Entwickeln gesammelt wurden, nicht außer Acht zu lassen. Diese sind unter "Zusätzliche Hinweise" angeführt. Für alle verwendeten Materialien befindet sich im Anhang eine vollständige Liste. Es wurden bei einigen Versuchen, zusätzlich zu den Schreibwaren, diverse andere Materialien benötigt. Das Bemühen bestand allerdings, diese auf ein Minimum zu reduzieren und nur das absolut Notwendige hinzuzunehmen, um dem Zugang dieser Arbeit treu bleiben zu können und Schreibutensilien im Fokus zu behalten. Auf mögliche Gefahren wird jeweils zu Beginn des Experiments hingewiesen.

3 Materialien

Die Beschäftigung mit Papier, Gummiringen oder Klebeband lässt die Frage aufkommen, womit man es zu tun hat und was damit angestellt werden kann. Möglichkeiten für Versuche

hängen stark davon ab, woraus das Material besteht. Dieses Kapitel widmet sich den "Protagonisten" geht deren grundsätzlichen Eigenschaften auf den Grund, um sich im Hauptteil der einzelnen Versuche diverse Exkurse zu sparen.

3.1 Papier

Schildkrötenpanzer, Knochen, Metalle, Steine, Bambusstreifen, Holztafeln und Seide dienten als Schreibuntergrund, bevor es zur Entwicklung des Papiers kam. Zahlreiche Fundstücke aus dem 16.-11. Jh. v. Chr. sind davon überliefert. Diese Stoffe waren jedoch recht unbrauchbar, da sie entweder selten oder unhandlich sind. (Vgl. Jixing 1989, 167) "Jahrelanges Experimentieren führte schließlich zur Entwicklung eines Pflanzenfaser-Papiers, das - laut Überlieferung - aus Hanf (wie im Seilereigewerbe), aus Lumpen und aus abgenutzten Fischernetzen bestand." (Jixing 1989, 167) Überreste des Hanf-Papiers aus dem Jahre 49 v. Chr., die in der Provinz Shaanxi entdeckt wurden, stellen den ältesten Pflanzenfaserfund dar und liefern den Beweis, dass Papier in China vor rund 2000 Jahren erfunden wurde. Die Arbeitsmethode ist in Abb. 3 erkennbar.

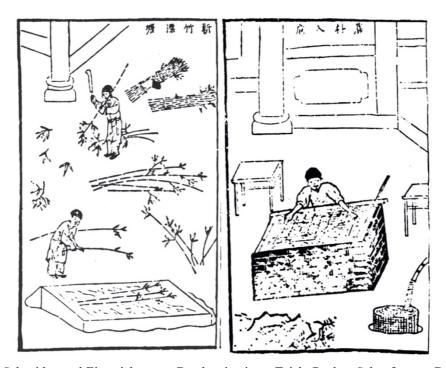


Abb. 3: Links: Schneiden und Einweichen von Bambus in einem Teich. Rechts: Schöpfen von Bambusbrei zum Formen eines Papierbogens - Illustration aus dem *Tian Gong Kai Wu (Werke der Natur und der Arbeit)* von Song Yingxing, 1637. (Jixing 1989, 171f.)

Mitte des 8. Jh. kam dann die Massenproduktion über Zentralasien und Arabien nach Europa. Spanien und Frankreich errichteten im 12. Jh. als erste Länder Papierfabriken, was dazu führte, dass um das 16. Jh. das Papier in Europa seine Vorgänger Pergament und Papyrus vollkommen verdrängte. (Vgl. Jixing 1989, 173) Zahlreiche technische Gerätschaften machten seit Johannes Gutenbergs Erfindung des Buchdrucks eine immer größer werdende Produktion des Papiers möglich.²

Zum heutigen Zeitpunkt können viele verschiedene Arten an Faserstofferzeugnissen je nach Beschaffenheit und Machart unterschieden werden. Folgende Arten können eingeteilt werden: Von *Papier* spricht man, wenn es sich um eine flächige Fasersuspension handelt, die auf einem Sieb getrocknet und anschließend verdichtet wurde und dessen Masse < 225 g/m² ist. *Karton* bezeichnet einen Werkstoff, dessen Masse zwischen 150 und 600 g/m² liegt und damit auch als Papier oder Pappe bezeichnet werden kann. Gegenüber der Pappe wird er aus qualitativ besseren Stoffen hergestellt. Die *Pappe* weist eine Masse > 225 g/m² auf und kann in *Vollpappe* und *Wellpappe* unterteilt werden. *Wellpappe* besteht aus einem gewellten Papier, welches mit flachem Papier beklebt wurde. (Vgl. Blechschmidt 2013, 30f.)

Etwa 3000 Sorten Papier sind aufgrund ihrer Zusammensetzungen und Einsatzzwecken zu unterscheiden. Vier Hauptgruppen unterteilen sie in:

1. *Grafische Papiere* (Druck- und Schreibpapiere)

Die Art des Einsatzes lässt eine Unterteilung in Büro- und Administrationspapiere bzw. Druck- und Pressepapiere zu.

- 2. *Verpackungspapiere und -karton* (zur Herstellung von Wellpappe oder Verkaufsverpackungen, z. B. für den Schutz von Lebensmitteln)
- 3. Hygienepapiere (z. B. Toilettenpapier, Serviettenpapier)

4. Technische Papiere und Spezialpapiere

Diese Gruppe ist am umfangreichsten und beinhaltet z. B. Papiere für den Banknotendruck oder Elektro-Isolationspapiere. (Vgl. Blechschmidt 2013, 37f.)

In den Experimenten werden zweierlei Sorten Papier verwendet: Herkömmliches Druckpapier (Kopierpapier) mit 80 g/m² und dünneres Seidenpapier mit einer Masse von unter 30 g/m². Für einige Experimente kann alternativ dünne Pappe verwendet werden. Eine

-

² Vgl. Blechschmidt 2013, S. 24-29. [Anm.: Siehe Tabelle]

ausführliche Auflistung aller gängigen Papiersorten findet sich im Taschenbuch der Papiertechnik.3

Die Eigenschaften, die sich aus den Bestandteilen der Sorten ergeben, sind durchaus manipulierbar. Manche Hölzer sind für bestimme Erzeugnisse prädestinierter als andere.

Die richtige Auswahl der Faserstoffe bildet [...] die [...] Grundlage, um gewünschte Papiereigenschaften zu erreichen. Jeder Faserstoff zeigt ein charakteristisches Mahlverhalten und gibt dem Papier bestimmte Eigenschaften. [...] Ausgesprochen "harte" Stoffe besitzen schlechte Festigkeitseigenschaften, besonders niedrige Falzzahlen [Anm.: mechanische Materialeigenschaft, siehe unten] und geringe Dehnungen. "Normale" zähe Stoffe zeigen gute Festigkeiten mit hohen Falzzahlen und guter Verfilzbarkeit. Ihre Mahlung benötigt etwas längere Zeit als jene der "harten" Stoffe. Bleichfähige oder weiche Zellstoffe zeigen bei genügenden Festigkeiten gute Falzungen und Dehnungen, auch entsprechende Saugfähigkeiten. (Wurz 1947, 14)

So wie der Feuchtegehalt bei der Herstellung eine große Rolle spielt, wirkt sich die Luftfeuchtigkeit auf das Material aus. Beim Falzversuch steigt der Falzwiderstand, interessanterweise oft umgekehrt zum Zugversuch, mit wachsender Luftfeuchtigkeit (vgl. Korn 1944, 109). Auf diese Tatsache lässt sich vermutlich auch die schlechte Performance diverser Papierflieger im Outdoor-Bereich zurückführen, wenn die dort herrschende Luftfeuchtigkeit zu hoch ist.

Eine weitere spannende Eigenschaft des Papiers stellt die unterschiedliche Festigkeit dar. Je nach Faserlagerung (Längs- oder Querrichtung), reißt das Papier unter verschieden hoher Zugbelastung. In Längsrichtung (Laufrichtung) ist diese Festigkeit höher. Wenn die Laufrichtung nicht bekannt ist, kann sie z. B. durch Befeuchten eines quadratischen Stückchens erkannt werden, da sich das Papier in Querrichtung wölbt oder man erkennt auch beim Einreißen, dass der Riss in Längsrichtung einen geraderen Verlauf aufweist. (Vgl. Wurz 1947, 233f.) Dies sollte beim Experimentieren im Hinterkopf behalten werden, wenn Stabilität wichtig ist.

3.2 Klebstoffe und Klebeband

Der Einsatz von geeigneten Klebstoffen beim Arbeiten mit Papier stellt sich als zentrales Problem dar. Einige Arten lassen das Papier beim Auftragen uneben werden und verhindern eine aerodynamische Form. Das stoffschlüssige Füge-Verfahren des Klebens wirkt, im Unterschied zum formschlüssigen und kraftschlüssigen durch die Zugabe eines gesonderten Stoffes. Dazu soll ein kurzer Einblick dem weiteren Verständnis dienen.

³ Vgl. Blechschmidt 2013, S. 39-51.

3.2.1 Aufbau und Funktion

Die DIN EN 923 - Norm bezeichnet Klebstoff als "nichtmetallischen Stoff, der Fügeteile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann". Also stellen Klebstoffe durch ihre chemische Zusammensetzung beim Auftrag auf zwei oder mehrere Oberflächen eine Kraftübertragung zwischen diesen her. (Vgl. Habenicht 2016, 4) Adhäsionskräfte wirken zwischen Molekülen unterschiedlicher Stoffe über die Grenzfläche, Kohäsionskräfte stellen Kräfte innerhalb eines Stoffes dar (Vgl. Roth 2016, 340)

Kohlenstoff als zentraler Baustein teilt den Großteil der Klebstoffe den organischen Verbindungen zu und kann durch seine 4-fache Valenz lange Ketten und Netze bilden - zwischen Kohlenstoffatomen - und auch in Verbindung mit Elementen wie: Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff. Über 1 Mio. Bindungs-Möglichkeiten sind dadurch möglich. Durch sie entstehen Ketten aus Monomeren, sogenannte Polymere. (Vgl. Habenicht 2016, 7f.)

3.2.2 Klebstoff

Es gibt unterschiedliche Einteilungen der Klebstoffe (vgl. Habenicht 2016, 10-14), z. B. nach Verarbeitungsart bzw. Aufbau:

- Reaktionsklebstoffe, die durch chemische Reaktionen aushärten
- Physikalisch abbindende Klebstoffe, die z. B. zuerst durch Lösungsmittel oder Wärme gelöst werden müssen, Haftklebstoffe (z. B. Klebeband),

nach Inhaltsstoffen:

- Klebstoffe mit und ohne Lösungsmittel
- Klebstoffe auf natürlicher oder künstlicher Basis (chemisch aushärtend)
- Klebstoffe auf organischer oder anorganischer Basis

oder Anwendungsbezogenheit.

- Kaltleim
- Tapetenkleister

Im Rahmen der Arbeit kommen drei spezifische Arten zum Einsatz:

3.2.3 Klebestift

Um Papier zu kleben, wird häufig diese Art des Klebens angewandt. Durch Abreiben eines in Stabform gepressten wasserlöslichen klebenden Polymers, entsteht ein dünner Film, der die zu klebenden Bauteile miteinander verbindet. Die Polymere sind in einer Art "Seifen-Gerüst" eingebunden, das unter Scherkräften aufbricht und die klebenden Polymere freisetzt. Klebestifte sind oft durch Wasser gut entfernbar. (Vgl. Habenicht 2016, 64)

3.2.4 Klebeband

Sogenannte Haftklebstoffe gibt es sowohl an Bändern wie Etiketten. Die permanent klebenden Polymere in Verbindung mit Harzen und Weichmachern haften unter Anpressdruck. Papiere mit "repositionierbaren" Klebstoffen (Notizzettel) sind so möglich.

3.2.5 Cyanacrylatklebstoff (Sekundenkleber)

Unter Luftfeuchtigkeit [Anm.: aus diesem Grund auch durch zusätzliche Feuchtigkeit verkürzbare Aushärtezeit] härtet der Sekundenkleber als Reaktionsklebstoff binnen sehr kurzer Zeitspannen aus.

3.3 Gummiringe

Gummiringe werden für eine große Zahl an Einsatzmöglichkeiten verwendet. 75% der heute in Verwendung stehenden Gummiprodukte bestehen aus synthetischem Gummi, wobei Gummiringe (od. Gummibänder) hauptsächlich aus natürlichem Gummi hergestellt werden. In schmale Streifen geschnittene Röhren bilden die typische Form der bekannten Gummiringe. Eine Vulkanisierung macht das Material haltbarer und elastischer. (Vgl. Wikipedia "Gummiband" 2020)

Die besondere Elastizität, auch Entropieelastizität, bewirkt bei Gummibändern ein Zurückkehren in den Ausgangszustand. Die reversible Streckung der langen Makromoleküle passiert unter Krafteinwirkung entlang der Hauptkette reibungsfrei beim Ändern der Bindungswinkel. Energie wird dabei gespeichert. Wenn die Kraft nachlässt, verdrehen sich die Moleküle wieder (mikrobrownsche Bewegungen). Dies tritt bei Polymeren über der Glas-

übergangstemperatur ein. Über dieser Temperaturgrenze wird ein festes Polymer gummiartig. An der oberen Temperaturgrenze zersetzt sich der Gummi. Der Elastizitätsmodul E gibt den Zusammenhang zwischen Spannung σ und Dehnung ε an und ist ein Materialkennwert. (Vgl. Wikipedia "Gummielastizität" 2020)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{1}$$

Die Spannungs-Dehnungs-Kennlinie ist stark materialabhängig, was anhand folgender Grafik erkennen wird.

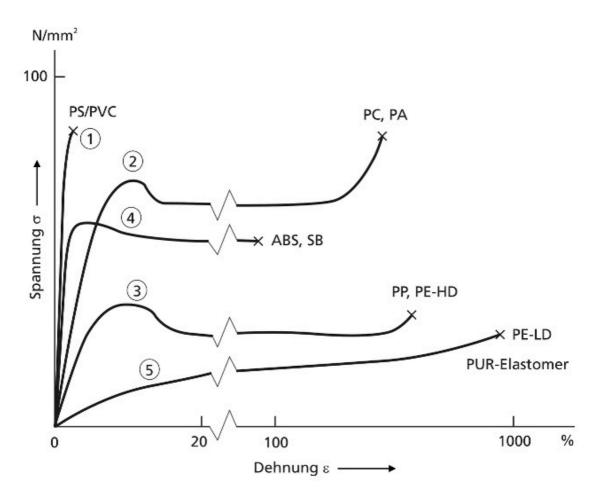


Abb. 4: Vergleich zwischen Elastomeren (5) und spröden Kunststoffen (1) im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Eyerer 2008, 76)

4 Experimente

Die Reihenfolge der Themen wurde so gewählt, dass der Aufbau, auch in den Unterkapiteln, möglichst sinnvoll in Bezug auf Komplexität und Didaktik ist. Jedes Kapitel beginnt, falls dies sinnvoll erscheint, mit einem einführenden themenbezogenen Exkurs, um die nachfolgenden Experimente physikalisch gut eingebettet zu wissen. In der eigentlichen Versuchsbeschreibung kann dadurch auf die Klärung der Grundlagen verzichtet werden. Es ergeben sich je Versuch vier Unterpunkte:

Der Materialliste folgt die Versuchsbeschreibung. In ihr dürfen auch vorbereitende Überlegungen bzw. Hypothesen angestellt werden, jedoch wird erst im darauffolgenden Punkt das Ergebnis präsentiert und anschließend physikalisch aufgegriffen. Zum Abschluss stehen nützliche Hinweise, mögliche Varianten, aber auch genauere Angaben zu eventuellen Gefahrenquellen, sollten diese nicht schon zu Beginn genannt worden sein.

4.1 Optik

4.1.1 Experiment 1: Interferenz am Doppelspalt

a) Materialien

- Drei 0.7 mm-Minen
- Durchsichtiges Klebeband
- Laserpointer

b) Vorbereitung und Durchführung

Es werden vier kleine Klebestreifen zurechtgeschnitten. Um die mittlere Mine werden zwei Streifen geklebt. Sie dienen als Distanzhalter und erzeugen den Doppelspalt. Die zwei verbleibenden Minen werden außen fixiert. Auf halber Höhe befindet sich nun ein klebebandfreier Bereich (siehe Abb. 5). Der Laserstrahl kann dort ungehindert auf den geschaffenen Doppelspalt treffen. Man richtet nun den Strahl im Abstand von ungefähr einem Zentimeter auf den Mittenbereich und zielt auf eine Wand.



Abb. 5: Doppelspaltkonstruktion

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

An der Wand ist das typische Interferenzmuster eines Doppelspalts zu sehen (Abb. 10). Bei zunehmendem Abstand wird die Abbildung größer und behält ihre Proportionen, jedoch nimmt die Intensität ab. Geringster Druck auf die Konstruktion führt zu starken Abbildungsveränderungen, da sich die Spaltbreiten dadurch ändern. Je kleiner der Spalt, umso breiter fächert sich das Muster auf.

Laserlicht besteht aus kohärenten Lichtstrahlen, hat also eine bestimmte Phasenrelation über längere Zeitintervalle und Distanzen (vgl. Portis 1980, 179). Dies ist für den Versuch

wichtig, da es nur so bei Überlagerung zum gewünschten Interferenz-Effekt kommen kann. Das Muster entsteht durch Beugung am Doppelspalt, da das Licht ausgehend von den beiden Spalten unterschiedlich lange Wege zurücklegen muss. Es kommt zur Auslöschung bzw. Überlagerung von Wellen am Schirm. In der Mitte existiert ein Maximum, da hier keine Weglängendifferenz besteht (vgl. Demtröder 2009, 311-312). Nach dem Huygensschen Prinzip kann jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle gesehen werden. Zunächst betrachten wir den Einzelspalt. Die ihn durchlaufenden parallelen Lichtstrahlen können beliebig oft geteilt werden und ergeben in unterschiedlichen Winkeln, wenn sich Vielfache der Wellenlänge des Lichts darin in einem bestimmten Verhältnis befinden, ein Muster. Dieses kommt zustande, weil sich Lichtbündel beginnen paarweise auszulöschen und wenn man das Bündel z. B. beim 2. Maximum in fünf Strahlen unterteilt, bleibt einer über, der dann das Maximum erzeugt. Bei einer Verschiebung, die durch den Winkel α auftritt, entsteht destruktive Interferenz immer, wenn diese Phasenverschiebung um $\lambda/2$ passiert. Mit der Formel, die sich aus Abb. 6 ergibt, lautet die Beziehung für Minima am Einzelspalt (vgl. Eichler 2004, 363):

$$\sin \alpha = k \frac{\lambda}{d},\tag{2}$$

wobei $k = 1, 2, 3, ..., \alpha$ der Winkel, d die Spaltbreite und λ die Wellenlänge des Lichts ist.

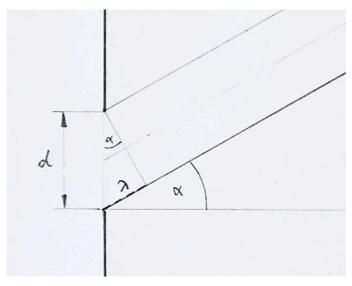


Abb. 6: Einzelspalt

Die Maxima ergeben sich bei:

$$\sin \alpha = (2k+1)\frac{\lambda}{2d} \tag{3}$$

Insgesamt entsteht beim Einzelspalt ein Bild wie in Abb. 7 zu sehen ist. Das Maximum in der Mitte (0. Max.) ist dermaßen stark ausgeprägt, oder anders formuliert, die weiteren Maxima im Vergleich so gering, da das 1. Max. nur 1/3 der Strahlen, das 2. Max. nur mehr 1/5 usw. beinhaltet und die Intensität dadurch stärker als beim Doppelspalt abnimmt.

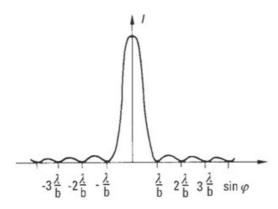


Abb. 7: Interferenzmuster am Einzelspalt (Eichler 2004, 363)

Der Doppelspalt besitzt kein 2. Maximum. Als zwei Einzelspalte betrachtet besitzen diese hier ihr Minimum, wodurch kein Licht für Interferenz zur Verfügung steht. Abb. 8 zeigt beide Arten in einer Grafik.

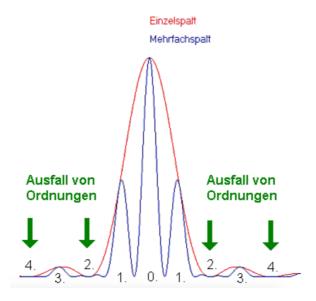


Abb. 8: Einzelspalt vs. Doppelspalt (https://www.schule-bw.de/faecher-und-schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche-faecher/physik/unterrichtsmaterialien/wellen/interferenz/ausfall_ordnungen.htm)

Anders als beim Einzelspalt, nimmt die Intensität bei steigender Ordnung nicht so schnell ab, es entstehen mehrere "Unterteilungen", wie in der grafischen Überlagerung in Abb. 8 zu sehen ist und es ergeben sich hier die Maxima bei:

$$\sin \alpha = k \frac{\lambda}{g},\tag{4}$$

wobei g den Spaltabstand bezeichnet.

Beugungsminima am Doppelspalt entstehen, sobald der Abstand zwischen den Spalten g > b ist mit b als Spaltbreite (Abb. 9) bei

$$\sin \varphi = \frac{\lambda}{2g}, \quad \frac{3\lambda}{2g}, \quad \frac{5\lambda}{2g} \quad usw.$$
 (5)

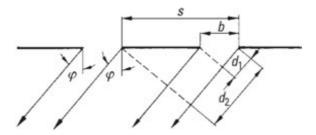


Abb. 9: Doppelspaltkonstruktion (Lüders 2015, 285)

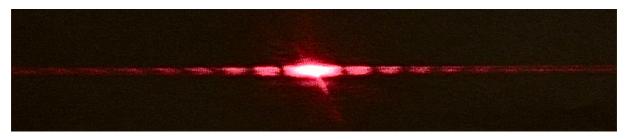


Abb. 10: Interferenzmuster durch Beugung am Doppelspalt im Freihandversuch

d) Zusätzliche Hinweise

Beim Kleben muss darauf geachtet werden, dass die Streifen dicht anliegen und keine Luftblasen oder Wölbungen zustande kommen, da sonst keine gute Abbildung entsteht. Ein dunkler Raum ist außerdem von Vorteil. Man kann die drei Minen auch ohne sie zu verkleben zwischen Daumen und Zeigefinger halten und sie, vom Laserstrahl beleuchtet, etwas hin und her drehen. Dadurch ändert sich das Bild kontinuierlich und die Maxima schieben sich zusammen oder auseinander.

4.1.2 Experiment 2: Die Lochkamera

a) Materialien

- 1 Blatt Papier
- kleines Stück Seidenpapier
- Klebeband oder Gummiringe
- Feuerzeug oder Kerze
- Zirkelspitze

b) Vorbereitung und Durchführung

Vom Din-A4-Blatt wird der Länge nach ein 6 cm breiter Streifen zugeschnitten, zu einer Rolle gewickelt und mit Klebeband fixiert. Ihr Durchmesser soll 2 cm betragen. Dann wird aus dem übrigen Papier ein Kreis mit ebenfalls 2 cm Durchmesser geschnitten und in dessen Mitte ein kleines Loch gestochen. Dieses fungiert später als Blende. Die Rolle wird nun mit der Blende auf der einen, mit Seidenpapier (Schirm) auf der anderen Seite verschlossen (siehe Abb. 11).



Abb. 11: Aufbau Lochkamera

In einem dunklen Raum hält man nun eine Flamme (Gegenstand) vor die Blende und betrachtet die Abbildung auf dem Schirm. Zu messen sind die Abstände g und b sowie die Größen G und B (Abb. 12).

g... Gegenstandsweite

b... Bildweite

B... Bildgröße

G... Gegenstandsgröße

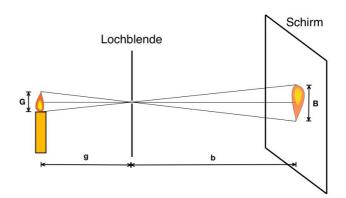


Abb. 12: Maße Lochblende (https://physikunterricht-online.de/jahrgang-7/die-lochkamera)

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Das Bild am Schirm steht auf dem Kopf. Seine Größe hängt vom Abstand zur Blende ab. Es wird kleiner, je größer man die Gegenstandsweite g wählt (Abb. 13). Wenn die Lochblende zu groß ist, wir das Bild unschärfer, da es für jeden Lichtstrahl mehr mögliche Wege gibt. Macht man sie kleiner, nimmt die Intensität ab und man kann das Bild nicht mehr erkennen. Für den vereinfachten Fall, dass das Bild scharf sei, kann man den Abbildungsmaßstab (Formel 6) anschreiben, um sich ein fehlendes Maß zu berechnen.⁴ Jedoch ist es nicht ganz einfach, die Höhe der Flamme am Bild und am Gegenstand zu messen.

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{a} \tag{6}$$

Die Abbildung der Lochkamera liefert den Beweis, dass sich die einfallenden Lichtstrahlen beliebig kreuzen können, ohne dabei miteinander zu interagieren. Die von jedem Punkt des Gegenstandes ausgehenden Strahlen, durchlaufen die Blende, treffen am Schirm auf und erzeugen das Bild. (Vgl. Jäger 2014, 24)

-

⁴ Vgl. Lüders 2015, S. 255. [Anm.: Strahlenoptik]



Abb. 13: Flamme brennt nach unten

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Alternativ kann als Blendenmaterial auch Aluminiumfolie verwenden werden. Das Loch sollte möglichst rund und ohne Grat gestochen werden. Wenn man den Seidenpapier-Schirm entfernt und mit bloßem Auge das Bild betrachtet, brennt die Flamme nach oben und der Aufbau scheint defekt zu sein. "Im Auge entsteht auf der Netzhaut ein reelles, auf dem Kopf stehendes Bild, wobei die Aufrechtstellung des Bildes durch die richtige Interpretation der Wahrnehmung im Gehirn erfolgt." (Lüders 2015, 260) Es handelt sich also um eine Sinnestäuschung. Unser Gehirn manipuliert die Informationen des auf der Netzhaut erzeugten Bildes, da Flammen logischerweise nach oben brennen und stellt es erneut auf den Kopf. Es sollte für das Experiment außerdem relativ dunkel sein, damit man die Abbildung gut erkennen kann, da die Intensität gering ist.

4.1.3 Experiment 3: Papierblende #1

a) Materialien

- 1 Blatt Kopierpapier
- Zirkelspitze, 0.5 mm Mine für das kleinste Loch
- Person mit Kurz- oder Weitsichtigkeit
- Lineal

b) Vorbereitung und Durchführung

Löcher unterschiedlichen Durchmessers werden in das Blatt gestochen (Abb. 14). Das kleinste (Durchmesser = 0.5 mm) mit einer Bleistiftmine dieses Durchmessers. Dann betrachtet eine z. B. kurzsichtige Person einen entfernten Gegenstand (weit genug entfernt, um ihn ohne optische Hilfsmittel unscharf zu sehen). Es sollen die unterschiedlichen Erfahrungen in die Tabelle (Tabelle 1) eingetragen werden. Mit dem Lineal sind die Lochdurchmesser zu messen.

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Tabelle 1: Papierblende Ergebnisse

| Lochdurchmesser (mm) | Abstand zum Gegen- stand (m) | Sehschärfenerfahrung in Worten | Helligkeit in Worten |
|----------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 0,5 | 3 | scharf | dunkel |
| 1 | 3 | scharf | etwas heller |
| 3 | 3 | unscharf | hell |

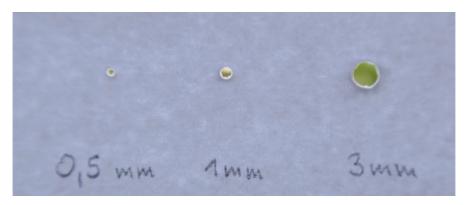


Abb. 14: Lochblenden



Abb. 15: Blick durch die Lochblenden (links 0,5 mm)

Die Lochgröße wirkt sich auf die Helligkeit und auf die Sehschärfe aus (Abb. 15). Bei einem Durchmesser von 3 mm, wird das Bild zwar heller, jedoch lässt auch die Schärfe nach. An den Proportionen und Farben ändert sich nichts. Vergleichbar mit einer Foto-Blende, schränkt ein kleines Loch die möglichen Wege des einfallenden Lichts ein. Damit erhöht sich die Schärfentiefe und man sieht auch entfernte Gegenstände scharf. In der Fotografie nutzt man diesen Effekt aus.

Eine weit offene Blende bzw. eine kleine Blendenzahl κ liefert einen schönen Unschärfeverlauf (eine besonders ästhetische Unschärfe, ein schönes 'Bokeh', wie die Profis sagen) und ermöglicht auch das Fotografieren bei wenig Licht. Die Gefahr, dass bildwichtige Teile unscharf sind, nimmt aber zu. (Gockel 2012, 21)

Eine kleine Blende (große Blendenzahl) reduziert die Helligkeit. Die Öffnung

$$\ddot{O} = \frac{d}{f} \tag{7}$$

und entspricht dem Verhältnis zwischen dem Blendendurchmesser d und der Brennweite f der vorangestellten Linse. Sie wird in der Fotografie häufig reziprok und in Kurzschreibweise angegeben, z. B. f2,8. Damit ist $\frac{d}{f} = 1$: 2.8 gemeint.

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Wichtig ist es, dass das Loch beim Durchstechen nicht stark ausgefranste Ränder hat, da die Helligkeit dadurch noch weiter reduziert wird. Statt der Papierblende kann man auch Daumen und beide Zeigefinger so aneinanderhalten, dass sich ein kleines (dreieckiges) Loch ergibt. Die "Blendenöffnung" lässt sich während des Hindurchblickens stufenlos verstellen und man erkennt, ab welchem Durchmesser die Tiefenschärfe wieder verschwindet.

4.1.4 Experiment 4: Papierblende #2 - Hornhautfehler erkennen

a) Materialien

- Papier- od. dünner Karton
- 0.5 mm Mine

b) Vorbereitung und Durchführung

In den Karton wird mit der Mine ein Loch mit 0.5 mm Durchmesser gestochen. Nun blickt man auf einen möglichst gut sichtbaren Hintergrund und versucht unter Drehung dieser Blende Unregelmäßigkeiten wie Schlieren im Bild zu erkennen (Abb. 16).

c) Ergebnis und Physikalische Erklärung



Abb. 16: Blick durch die Kartonblende mit 0,5 mm Blendenöffnung

Falls die Störungen im Bild beim Drehen stationär bleiben, kann man auf ins Auge gelangte Fremdkörper schließen. Wimpern sieht man z. B. im Bild, wenn das Auge nur leicht geöffnet ist. Auch Verformungen und Kratzer an der Hornhaut sind zu erkennen. In der Augenheilkunde spricht man von der sogenannten "stenopäischen Lücke". Es ist ein Hilfsmittel, um verminderte Sehschärfe zu beurteilen. Die runde Kunststoffscheibe besitzt ein Loch mit 1-2 mm Durchmesser in der Mitte, durch das von PatientInnen geblickt wird. Somit werden Randstrahlen eliminiert. Sollte das Vorhalten der Lücke keine Verbesserung der Sehschärfe mit sich bringen, liegen andere Ursachen vor, die diese Fehlsichtigkeiten hervorrufen. (Vgl. Wikipedia "Stenopäische Lücke" 2020)

Zur Kurzsichtigkeit sei gesagt, dass den Fehlsichtigen eine Fokussierung ins Unendliche nicht gelingt. Dafür gibt es unterschiedliche Gründe: Wenn sich die Augenlinse nicht weit genug entspannt oder wenn der Abstand zwischen Linse und Netzhaut zu groß ist. Durch eine Zerstreuungslinse in Form von Brillen oder Kontaktlinsen, die direkt an der Hornhaut anliegen, kann dies korrigiert werden. (Vgl. Roth 2019, 189)

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Genauso liefert die Zeigefinger-Daumen-Lücke einen ähnlichen Effekt. Wichtig scheint, dass der Lochdurchmesser klein ist, da sonst der Effekt sehr schwach und möglicherweise unerkannt bleibt.

4.1.5 Experiment 5: Papierblende #3: Die Sonne an der Wand

a) Materialien

- Papier
- Cutter-Messer
- Zirkelspitze

b) Vorbereitung und Durchführung

In das Papier werden Löcher mit verschiedenen Geometrien geschnitten (Abb. 17). Es wird nun das Blatt im Abstand von 0-2 m von einer Wand entfernt, die als Schirm dient, in die Sonne gehalten. Die verschiedenen Abbildungen, die durch die Blenden entstehen, sollen nun betrachtet werden.



Abb. 17: Blendengeometrien



Abb. 18: Abbildungen, Abstand 0.3 m



Abb. 19: Abbildungen am weißen Schirm, Abstand 1-2 m

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Die Abbildungen an der Wand sind bei einem Abstand von über 1 m immer kreisrund (Abb. 19). Sie entsprechen den Blenden-Geometrien nur, wenn der Abstand gering ist (Abb. 18). Das kann mit dem Unterschied zwischen Blende und Luke erklärt werden. Umso weiter die Abbildung von der Luke entfernt liegt, desto unschärfer wird sie. Als Luke kann jede Einschränkung des Strahlengangs bezeichnet werden. Die Einschränkung des Strahlengangs passiert ohne einer zusätzlichen Luke bei optischen Anordnungen durch die Geometrie der Linse oder des Spiegels, die damit den Winkel des Strahlengangs bestimmt. Ab einem bestimmten Abstand, wird im Experiment aus der Luke eine Blende, die den Strahlengang so weit einschränkt, dass sich die Geometrie der Blende nicht mehr abbilden lässt, die Ränder immer unschärfer werden und die Abbildungen als kreisrundes Bild an die Wand entsteht. Das Bild entspricht dem optischen Ereignis auf der anderen Seite der Blende, also der Sonne. Der Übergang zur Blende ist dabei fließend und kann durch die Überlagerung der Beugungsscheibehen erklärt werden.

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Man kann außerdem Vergleiche zwischen unterschiedlichen Blendengrößen anstellen und erkennt, dass die Größe des Bildes bei konstantem Abstand zum Schirm gleich bleibt. Lediglich die Helligkeit differiert. Es gibt hierzu ein anschauliches Video.⁵

4.1.6 Experiment 6: Stift im Wasserglas

a) Materialien

- Stift
- rundes Glas (3/4 gefüllt mit Wasser)

b) Vorbereitung und Durchführung

Dreierlei optische Phänomene sollen mit diesem einfachen Aufbau untersucht werden. Der Stift wird ins Glas gestellt. Zuerst betrachtet man ihn schräg von oben (Abb. 21), dann paral-

⁵ Siehe: https://www.youtube.com/watch?v=liqF6EamiE4&feature=g-all [Stand: 30.5.2020]

lel zur Wasseroberfläche (Abb. 20) und anschließend mit dem Blick von schräg unten auf die Wasseroberfläche (Abb. 22).



Abb. 21: Bleistift im Glas #1



Abb. 20: Bleistift im Glas #2



Abb. 22: Bleistift im Glas #3

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Es scheint, dass sich genau an der Wasseroberfläche ein Knick im Stift befindet. Die Lichtbrechung ist für dieses Phänomen verantwortlich. Licht wird beim Übergang vom optisch dünnerem zum optisch dichteren Medium zum Lot hin gebrochen. Optisch dünnere Medien besitzen eine geringere Brechzahl n, als optisch dichtere.⁶ Für Einfallswinkel α und Ausfallswinkel β gilt:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}.\tag{8}$$

25

⁶ Vgl. Lüders 2015, S. 242. [Anm.: Tab. 8.1: Absolute Brechzahlen einiger Stoffe]

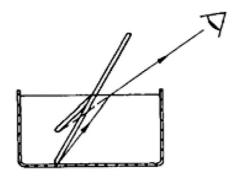


Abb. 23: Lichtbrechung (Lüders 2015, 240)

Die optische Illusion wird durch Abb. 23 erklärt. Zum Auge gelangt das Licht eines Punkts unter der Wasseroberfläche über einen "geknickten Strahl", weshalb er höher erscheint.

Von der Seite aus betrachtet, wirkt es so, als ob der Stift einen Versatz hat und der Stift unter der Oberfläche etwas breiter ist (Abb. 20). Hierbei spielen zwei andere Effekte eine Rolle. Die Brechung zwischen Wasser und Glas lässt den Versatz entstehen, sobald man den Stift nicht mittig positioniert. Dabei bewirkt die Krümmung des Glases eine optische Verbreiterung und einen stärkeren Versatz beim Betrachten, umso weiter außen und somit dezentrierter der Stift ist.

Totalreflexion tritt beim Blick von unten auf und man erkennt die Spiegelung an der Wasser-Unterfläche. Wenn in Formel 8 der Winkel $\beta=90^\circ$ wird, streift der ausfallende Strahl die Fläche - sie beginnt zu spiegeln. Der dadurch geschaffene Spiegel reflektiert den eintauchenden Bleistift und liefert das in Abb. 22 zu sehende Bild. (Vgl. Lüders 2015, 242) Der Grenzwinkel α_g berechnet sich durch

$$\sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1},\tag{9}$$

wobei n_2 die Brechzahl des Wassers, n_1 die der Luft ist.

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Der Ausfallwinkel β hängt natürlich davon ab, wie groß der Einfallswinkel ist und der hängt wiederum davon ab, in welchem Winkel von unten in das Glas geschaut wird.

4.2 Elektrizität

In diesem Kapitel steht Graphit als Material im Fokus. Er ist eine elementare Erscheinungsform von Kohlenstoff, mit der Besonderheit, dass sich seine Struktur aus übereinanderliegenden Kohlenstoffschichten zusammensetzt, die wiederum aus C₆-Ringen bestehen. Er existiert in verschiedene Arten wie z. B. hexagonaler α-Graphit oder rhomboedrischer β-Graphit. Ersterer ist von oben betrachtet wabenartig. Natürlicher Graphit ist undurchsichtig und als Masse leicht spaltbar, was ihn stark abfärben lässt. Sein Schmelzpunkt liegt bei 4000 - 5000 K, wenn Drücke von über 100 bar vorherrschen, sonst sublimiert Graphit. Der in der Literatur angegebene Wert für die Schmelztemperatur schwankt um 1000 K. Dies hängt von der Methode ab, mit der die Proben erhitzt werden. (Vgl. Pottlacher 1993, 183)

Graphit ist außerdem gut wärmeleitfähig, chemisch widerstandsfähig und elektrisch leitfähig (vgl. Holleman 2017, 996-998) Der spezifische Widerstand von Graphit ist mit $8.0 \cdot 10^{-6} \Omega m$ im Vergleich zu Metallen relativ hoch.⁷

4.2.1 Experiment 7: Graphit-Potentiometer

a) Materialien

- Bleistift
- Papier
- Batterie (9 V)
- LED (für 3 V dimensioniert)

b) Vorbereitung und Durchführung

Mit einem weichen Bleistift werden Linien, wie in Abb. 24 zu sehen, gezeichnet. Es muss beim Schließen des Stromkreises darauf geachtet werden, dass die Polung der Diode richtig ist, da sie sonst zerstört wird. Die Kathoden-Seite (-) besitzt eine Abflachung.

Der Aufbau dieser Dioden ist im Inneren kegelförmig. Dort befindet sich ein Halbleiterkristall, der eingelötet in der Fassung an ebendiese auch Wärme abgibt, um nicht zu überhitzen. Die Anschlussdrähte bestehen aus verzinntem Stahl, um die Diode beim Einlöten

-

⁷ Vgl. Lüders 2015, S. 85. [Anm.: Tab. 3.1]

nicht zu überhitzen. Man nutzt hier die geringe Wärmeleitfähigkeit von Stahl aus. (Vgl. Wikipedia "Leuchtdiode" 2020)

Nun hält man die Kontakte der Batterie und der Diode an den Graphitstrich und bewegt die Batterie entlang der Linien zur Diode.



Abb. 24: Graphit als Leiter

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Wenn sich die Batterie in Richtung der Diode bewegt, scheint sie kontinuierlich heller zu werden (Abb. 25).



Abb. 25: Graphit als Leiter, Diode leuchtet

Umso größer die Strecke, desto größer ist der Widerstand der Graphitleiter und die Helligkeit nimmt ab. Damit ist ein einfaches Potentiometer entstanden. Von Potentiometern oder Spannungsteilern spricht man, wenn ein Widerstand variabel eingestellt werden kann, z. B. als

Schiebe-, oder Drehwiderstand (Abb. 26). Die Spannung $U = R \cdot I$ entsteht am Widerstand, der sich je abgegriffener Länge verändert. (Vgl. Lüders 2015, 88)

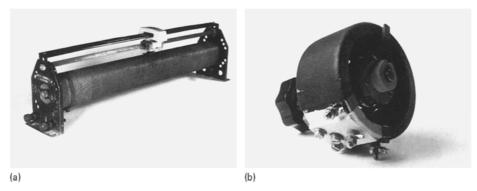


Abb. 26: Schiebewiderstand (a) und Drehwiderstand (b) (Lüders 2015, 89)

Die Graphit-Striche fungieren in unserem Fall also als Schleifwiderstände.

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Natürlich können auch komplexere Schaltungen entstehen, wenn aus Papier eine Art "Schalter" gebaut wird, welcher niedergedrückt den Stromkreis schließt.

4.2.2 Experiment 8: Elektrostatik mit Lineal und Papier

a) Materialien

- Kunststofflineal
- Seidenpapier
- Bleistift mit Radiergummi oder Radiergummi

b) Vorbereitung und Durchführung

Das Papier wird in kleine Stücke geschnitten und auf den Tisch platziert. Darauf legt man das Lineal und reibt einige Sekunden flach aufliegend über die Schnipsel. Nun hebt man das Lineal vorsichtig an (Abb. 27).



Abb. 27: Elektrostatik mit Lineal und Papier

Je nach Reibe-Intensität und Anpressdruck bleiben unterschiedlich viele Papier-Stückchen an der Unterseite des Lineals hängen und werden beim Anheben nach oben mitgerissen. Der Untergrund macht dabei keinen Unterschied. Es kommt zu einer elektrostatischen Aufladung zwischen dem Kunststofflineal und dem Papier. Diese Aufladung entsteht durch "innigen Kontakt zweier verschiedene Stoffe" (Lüders 2015, 6), in diesem Fall durch die Reibung zwischen Papier und Kunststoff. Reibung entsteht durch die rauen Oberflächen der beiden Materialien. Sie scheinen zwar glatt, jedoch erkennt man bei genauerer Betrachtung eine feine Struktur (Abb. 28). Die entstandene Ladungsverschiebung wird als elektrische Influenz bezeichnet. Die Ladungen als Influenzladungen. (Vgl. Gobrecht 1971, 27f.)

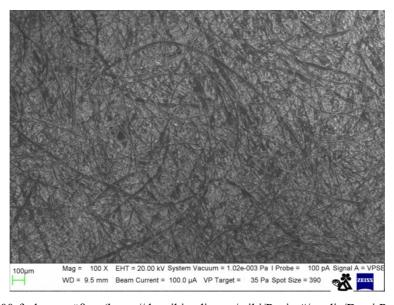


Abb. 28: Papier 100-fach vergrößert (https://de.wikipedia.org/wiki/Papier#/media/Datei:Paper_sheet_100x___SEM_MUSE.tif [Stand: 30.05.2020])

Reibungselektrizität wurde schon im Altertum bei Bernstein entdeckt. William Gilbert (1544-1603) stellte fest, dass es sich um eine andere Kraft als die magnetische Anziehung handelt und es mit unterschiedlichen Materialien, wie Glas, Steinsalz oder Kolophonium zu dem Phänomen kommen kann. Anstelle von Reibungselektrizität sollte eher von Berührungs- oder Kontaktelektrizität gesprochen werden, da sich die Oberflächen eng anliegend berühren müssen und Reibung alleine nicht ausreichend bzw. notwendig ist. Anhand eines Experiments, bei dem eine Paraffinkugel in Wasser taucht, wird dies deutlich. Hier tritt sehr wenig bis keine Reibung auf, jedoch kommen sich die Oberflächen nahe, was bei festen Stoffen aufgrund der Oberflächenrauigkeit erschwert wird. (Vgl. Gobrecht 1971, 5)

Wird ein Gegenstand positiv oder negativ elektrisch aufgeladen, bewegen sich die Ladungen an seine Oberfläche⁸ und können diese abgeben, sofern sie bis zu einem gewissen Grad als Leiter deklariert werden können. Kunststoff und Papier gelten neben anderen Stoffen wie Glas, Quarz, Seide und Gas als gute Isolatoren, weshalb ein Ladungsaustausch nur langsam geschieht. Durch Zusammendrücken und Reiben entsteht bei anschließender Trennung eine elektrische Ladung beider Stoffe. (Vgl. Raith 2006, 19-21) Die Permittivität gibt an, wie gut sich Materialien polarisieren lassen. Somit ist ein Stoff mit höherer Permittivität ε stärker polarisierbar und baut bei Aufladung ein stärkeres Feld auf, als das mit ihm in Kontakt kommende Material.

Um experimentell zu überprüfen, ob sich das Papier am Lineal oder das Lineal am Tisch aufgeladen wurde, sollte der Versuch erneut in einer anderen Variante durchgeführt werden. Einen Papier-Schnipsel legt man auf die Unterseite des Lineals und reibt ihn mit dem Radiergummi haltend an der Lineal-Fläche. Er wird haften bleiben. Reibt man ihn mit dem Finger, funktioniert es nicht zwingend. Dies lässt den Schluss zu, dass die Fingerkuppe über den Körper die Ladungen abführt und da das Lineal mit der anderen Hand gehalten wird, kommt es zu einem Ladungsausgleich. Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab. Es kann davon ausgegangen werden, dass Papier und Lineal vor dem Versuch neutral geladen sind. Da sie sich anziehen, müssen sie ungleichnamig geladen sein. Damit dies geschieht, müssen z. B. durch festes Reiben, Elektronen vom Lineal aus zum Papier übergehen und dieses dadurch negativ laden. Das Lineal ist dadurch positiv geladen und wird aufgrund seiner isolierenden Eigenschaft beim erneuten, losen Kontakt auch nicht sofort entladen, sondern zieht die Papier-Schnipsel an.⁹

-

⁹ Vgl. Raith 2016, S. 22. [Anm.: Siehe Tabelle]

⁸ Anm.: Vgl. Funktionsweise des Van-de-Graaff-Generators/Bandgenerators bzw. der Influenzmaschine

Es kann auch mit feuchtem Papier experimentiert werden, um nachzuweisen, dass Feuchtigkeit auf Isolatoren einen negativen Einfluss hat.¹⁰

4.3 Mechanik

4.3.1 Experiment 9: Brückenstabilität mit Papier

a) Materialien

- Papier
- Kleber
- 2 Stifte
- 3 Münzen

b) Vorbereitung und Durchführung

Es werden drei unterschiedliche Versuchsaufbauten für Brücken getestet, um im Anschluss darüber zu diskutieren, welche Unterschiede in Bezug auf Belastung zu erkennen waren. Die zwei Stifte dienen als Auflager und können auch durch andere Gegenstände ersetzt werden. Münzen werden als Testmassen mittig auf der Brücke platziert. Als Erstes wird ein 40 x 150 mm großer Streifen ohne Zusatzmassen auf die mit einem Abstand von 100 mm entfernten Stifte platziert (siehe Abb. 29). Beim zweiten Aufbau werden die langen Kanten um 5 mm im rechten Winkel aufgefaltet und die Brücke erneut belastet. Diesmal von beiden Seiten (Abb. 30 und Abb. 31). Dann wird der Streifen zusätzlich drei Mal gefaltet, damit eine ziehharmonika-artige Fläche entsteht und diese wird wieder von beiden Seiten mit Münzen belastet (Abb. 32 und Abb. 33).

_

¹⁰ Anm.: Vgl. Papierkondensatoren.



Abb. 29: Papierbrücke hängend



Abb. 30: Papierbrücke mit Kanten #1



Abb. 31: Papierbrücke mit Kanten #2



Abb. 32: Papierbrücke gefaltet #1



Abb. 33: Papierbrücke gefaltet #2

Beobachten kann man, dass im ersten Durchgang auch ohne Zusatzmasse eine deutliche Durchbiegung s von ungefähr 3 mm auftritt. Bei bekannter Breite b, Dicke d, Länge L, Elastizitätsmodul s und Eigengewicht G, würde sich die Durchbiegung mit

$$s = \frac{1}{4E} \frac{L^3}{bd^3} G \tag{10}$$

berechnen. Dies ist jedoch für diese Experiment eher schwierig. Wir nehmen für die Rechnung vereinfachte Werte, an und kommen mit Glg. 7 auf folgende Rechnung:

$$s = \frac{1}{4 \times 2000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \frac{100 \text{ mm}^3}{40 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}^3} 0.5 \times 10^{-2} \text{ N} = 0.016 \text{ mm}$$

Folgende Werte¹¹ wurden eingesetzt:

- Elastizitätsmodul $E = 2000 \text{ N/mm}^2$
- Länge L = 100 mm
- Breite b = 40 mm
- Dicke d = 0.1 mm
- Eigengewicht $G = 0.5 \times 10^{-2} \text{ N}$

Der Zahlenwert für die Durchbiegung hängt stark von den Materialeigenschaft des Papiers ab und es überrascht nicht, dass zwischen den Versuchs- und Rechenergebnissen eine Differenz auftritt. [Anm.: Weitere Informationen siehe Fußnote 11]

Das Auffalten der Außenkanten bringt um einiges mehr Stabilität und liefert, je nach Belastungsseite, andere Ergebnisse. Mit nach unten liegenden Kanten ist sie stabiler, was auf die Belastungsart der Kanten zurückzuführen ist (Abb. 31). "Bei Biegung erhalten die Randfasern die stärkste Beanspruchung, die neutrale Faser ist spannungslos, [...]. Biegespannungen sind Zug- und Druckspannungen (Normalspannungen)." (Böge 2017, 337)

Die aufgestellten Kanten gelten als Randfasern und halten auf Druck nicht so viel aus bzw. knicken unter steigender Beanspruchung ein (Abb. 30). Der dritte Versuch führt zu einer noch höheren Stabilität und bringt auf beiden Seiten gute Ergebnisse (Abb. 32). Es kann also daraus geschlossen werden, dass mehrmaliges Falten gewinnbringend für die Stabilität ist und, dass Kanten unter Druck-Belastung zum Einknicken neigen.

¹¹ Vgl. [Anm.: Werte entnommen]

https://www.ptspaper.de/fileadmin/PTS/PTSPAPER/01_Ueber_uns/Dokumente/Veroeffentlichungen/2015_WP W Planlage Teil1 3 2015.pdf [Stand: 30.05.2020]

Die Feuchtigkeit des Papiers hat einen sehr großen Einfluss auf die Durchbiegung beim ersten Versuch.

4.3.2 Experiment 10: Der "stabilste" Papierwürfel der Welt

a) Materialien

- Papier
- Kleber
- Bücher

b) Vorbereitung und Durchführung

Die 2 cm breiten und 10,5 cm langen Papierstreifen werden der Länge nach gefaltet. Insgesamt sind zwölf dieser Streifen notwendig. Sie werden zu einem Würfel geklebt. An den Kanten ergeben sich Ecken, an denen sich je drei dieser Papierwinkel zusammenfügen. Somit entsteht ein stabiler Würfel (Abb. 35). Nach dem Trocknen des Klebers wird er mit einer Zusatzmasse belastet, bis er zusammenbricht (Abb. 36). Eine mögliche Verstärkung kann durch Einfügen von Diagonal-Stäben erzielt werden (Abb. 37). Es entstehen dadurch Dreiecke. Bei Fachwerken mit vier Stäben ist Instabilität gegeben, wenn die Verbindungsstellen als Gelenke angesehen werden. Mit

$$s = 2k - 3 \tag{11}$$

wobei s=4 für die Anzahl der Stäbe und k=4 für die Anzahl der Knoten eingesetz wird, ist das Viereck für Kraftübertragungen daher ungeeignet und statisch unbestimmt. Erst bei s=5 tritt statische Bestimmtheit ein. (Vgl. Böge 2017, 71) Durch Abb. 34 wird dieses Beispiel nochmals verdeutlich.

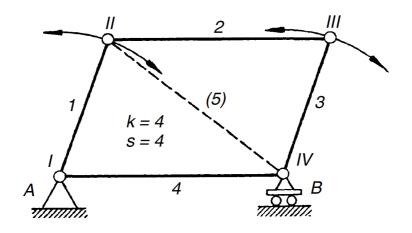


Abb. 34: Gelenksviereck (Böge 2017, 71)

Der Cremona-Plan gibt Aufschluss über die in den Stäben vorherrschenden Kräften. Er ist eine grafische Möglichkeit, den Betrag der Kräfte und ihre Art (Druck oder Zug) in Erfahrung zu bringen. Dazu müssen zuvor durch Berechnung alle außen angreifenden Kräfte bestimmt werden. Dann wird die Konstruktion gezeichnet, wobei die Längen der Kräfte maßstabsgetreu deren Beträgen entsprechen. Ein allgemeiner Drehsinn wird festgelegt, mit dem um die einzelnen Knoten verfahren wird. Nun wird begonnen, die Kräfte in einer neuen Zeichnung miteinander in Verbindung zu bringen, wobei der Umlaufsinn um die einzelnen Knoten die Reihenfolge der einzuzeichnenden Kräfte bestimmt. Sie werden aneinandergereiht, um Kräftedreiecke und Vielecke im Maßstab entstehen zu lassen, die dann in die erste Zeichung wieder übertragen die Richtung (Zug oder Druck) liefern.¹²

In diesem Experiment herrscht jedoch keine statische Bestimmtheit vor und die wirkenden Kräfte würden im Plan alle auf einer Linie liegen. Falls versucht werden würde, einen schrägen Stab einzuzeichnen, wäre dieser dann ein Null-Stab, der keine Kräfte aufnimmt und somit im Cremona-Plan keine Länge hätte. Derartige Konstruktionen funktionieren in unserem Fall nur, da die Knoten keine Gelenke, sondern starre Klebeverbindungen sind.

 $^{^{12}\} Anm.:\ Detaillierte\ Anleitung\ unter:\ https://www.youtube.com/watch?v=f0wscFzWyB4\&t=737s\ [21.6.2020]$

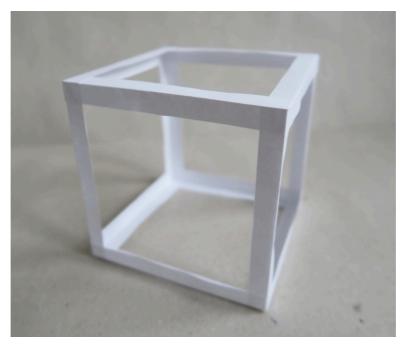


Abb. 35: Papierwürfel #1

Der Würfel hält den Kräften kurzzeitig stand. Seine horizontalen Stäbe knicken jedoch nach kurzer Zeit ein und er bricht zusammen (Abb. 37).



Abb. 36: Papierwürfel #2



Abb. 37: Papierwürfel zerstört

Bei der Belastung von oben müssen die stehenden (Druck-)Stäbe die gesamte Masse tragen. Sie sind, wie in Abb. 36 schon zu erkennen ist, das schwächste Glied. Durch eine zusätzliche Strebe, entstehen Dreiecksflächen, die eine höhere Stabilität aufweisen und die Konstruktion unter gleiche Belastung nicht zusammenknicken lassen (Abb. 38).



Abb. 38: Papierwürfel mit Verstärkung

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Es macht einen großen Unterschied, welches Papier in Bezug auf Steifigkeit und Feuchtegehalt verwendet wird. Beim Kleben der Kanten kann eine Pinzette sehr hilfreich sein.

4.3.3 Experiment 11: Schwerpunktmessung

a) Materialien

- langer Bleistift
- 2 Gummiringe
- 50-Cent-Münze als Testmasse (7,8 g)
- einige Heftklammern
- Heftklammermaschine
- Geo-Dreieck od. Lineal

b) Vorbereitung und Durchführung

Die Münze wird wie in Abb. 39 zu sehen, mit einer zusammengebogenen Heftklammer am Gummiband gehalten. Die zu messende Masse (Heftklammermaschine) wird auch mit einer Heftklammer an einen Gummiring gehängt. Nun werden die Ringe samt ihrer Massen möglichst weit voneinander entfernt am Stift montiert und mit der Position des Zeigefingers ausbalanciert (Abb. 40). Als zu erfassende Maße sind die Abstände zwischen Schwerpunkt (Zeigefingerposition) und den Gummibändern festzuhalten. Es gilt nun rechnerisch herauszufinden, wie schwer die Masse der Klammermaschine ist.



Abb. 39: Münze als Testmasse



Abb. 40: Balance zwischen Münze und Klammermaschine

Gemessen wurden: Abstand a=105 mm und Abstand b=25 mm. Es soll nun die Frage beantortet werden, welche Masse die Klammermaschine hat. Eine mögliche Herangehensweise stellt das Hebelgesetz, bzw. grundlegend die Definition des Drehmoments \vec{M} dar, das sich aus der Kraft \vec{F} und dem Abstand \vec{r} um einen Drehpunkt ergibt.

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \tag{12}$$

Wir gehen nun davon aus, dass die Gummibänder im rechten Winkel zum Bleistift stehen und können mit den Abständen a und b vom Drehpunkt schreiben:

$$a \cdot F_{M\ddot{u}nze} = b \cdot F_{Klammer} . \tag{13}$$

Daraus ergibt sich

$$F_{Klammer} = \frac{a \cdot F_{M\ddot{u}nze}}{b} \cong \frac{0.105 \text{ m} \cdot 7.8 \cdot 10^{-2} \text{ N}}{0.025 \text{ m}} = 0.3276 \text{ N} \cong 0.033 \text{ kg}$$

Bei einer zweiten Messung mit der Küchenwaage zeigt diese eine Masse von 37 g an, was sehr nah an das vorherige Ergebnis von 33 g kommt. Somit scheint der Aufbau zu funktionieren.

Mit zu kleinen Abständen am Bleistift verschlechtert sich das Ergebnis, da die Hebellängen sehr kurz werden und ein Messfehler stärker ins Gewicht fällt.

4.3.4 Experiment 12: Trägheit von Büchern

a) Materialien

- langer Gummiring
- 8 runde Bleistifte
- unterschiedlich schwere Bücher

b) Vorbereitung und Durchführung

In die Bücher wird ein aufgeschnittener Gummiring geklemmt. Diese werden nun auf Bleistiften gelagert, auseinandergezogen und losgelassen (Abb. 41). Es sollen Bücher mit unterschiedlich großen Massen miteinander kombiniert werden.

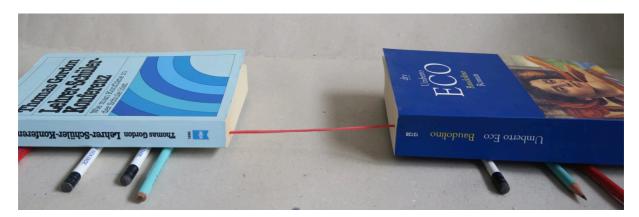


Abb. 41: Trägheit Bücher

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Das Buch mit der geringeren Masse erreicht eine höhere Geschwindigkeit, als das schwerere. Dies kann auf die wirkende Trägheit zurückgeführt werden. Newtons drittes Axiom, das Reaktionsprinzip, besagt, dass Kräfte stets paarweise auftreten, wenn ein Körper auf einen ande-

ren eine Kraft ausübt. "Actio = Reactio" bedeutet, dass die beiden Kräfte gleich groß und entgegengerichtet sind. (Vgl. Roth 2016, 84)

Das Gummiband bewirkt eine Kraft, die auf beide Bücher in gleicher Höhe wirkt. Ab dem Zeitpunkt des Loslassens, tritt ein neuer Effekt ein, der von der unterschiedlich großen Trägheit der beiden Bücher abhängt. Das Trägheitsprinzip formuliert Newton im ersten Axiom wie folgt: Jeder Massenpunkt verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung auf geradliniger Bahn, solange keine Kräfte auf ihn wirken. Wirkt eine Kraft, führt dies zu einer Beschleunigung des Körpers relativ zum Fixsternhimmel. (Vgl. Lüders 2012, 60) Die Kraft *F* lässt sich schreiben als:

$$F = m \cdot a \tag{14}$$

mit der Masse m und der Beschleunigung a. Nachdem die Kraft auf beide Bücher gleich groß ist, wirkt sich die Massendifferenz auf die Beschleunigung aus. Das leichtere Buch wird also schneller beschleunigt.

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Rollreibung ist deutlich geringer als Haft- und Gleitreibung. Es ist darauf zu achten, dass die Rollreibung der Stifte für diesen Versuch eine tragende Rolle spielt. Sie sollte möglichst gering gehalten werden und für beide Bücher zirka gleich groß sein. Darum sind pro Buch auch mindestens drei Stifte erforderlich.

4.3.5 Experiment 13: Büroklammerkreisel (Sakai-Kreisel)

a) Materialien

- große Büroklammer
- Zange (zum besseren Biegen)

b) Vorbereitung und Durchführung

Die Klammer wird aufgebogen und laut Abb. 42 zu einem Kreisel geformt. Es sind einige Nachbesserungen notwendig, damit er stabil rotieren kann. Der erste und zweite Knick ist bei ungefähr 1 cm zu biegen. Dann wird die Rundung gebogen und zum Schluss noch zwei Kni-

cke, um wieder in der Rotationsachse zu liegen. Der optimale Winkel β zwischen den beiden Schenkeln ist 53° (vgl. Roth 2016, 271).

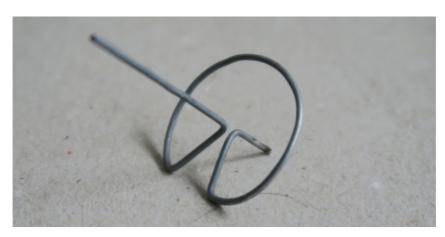


Abb. 42: Büroklammerkreisel

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Beobachtet werden können die Rotationsbewegung des Kreisels, die ihn in einer stabilen Position hält. Je nach baulichem Geschick, weist er jedoch mehr oder weniger ausgeprägt auch andere Phänomene auf. Ein Drehmoment, das auf die Achse wirkt, führt eine Rotationsbewegung um die Achse herbei. Sie wird als Präzession bezeichnet und hat eine geringere Winkelgeschwindigkeit, als die der Hauptrotationsbewegung (Abb. 43). Das verursachende Drehmoment wirkt um den Punkt, an dem der Kreisel gelagert ist, also seiner Spitze.



Abb. 43: Büroklammerkreisel

Abb. 44 zeigt die Modellierung anhand des Gyroskops. Die zusätzliche Kraft *F* entsteht hierbei durch ein angehängtes Gewicht. Im Fall unseres Experiments ist dies die schlechte Symmetrie durch das Biegen bzw. die nicht senkrechte Rotationsachse beim Antauchen.

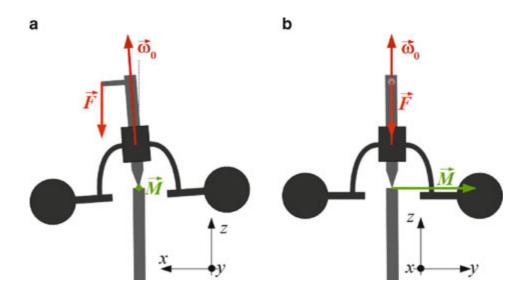


Abb. 44: Gyroskop mit Hebelarm (Roth 2016, 268)

Die Winkelgeschwindigkeit der Präzession

$$\omega_p = \frac{rmg}{I\omega},\tag{15}$$

wobei r der Abstand vom Auflagepunkt zum Schwerpunkt, m die Masse, g die Erdbeschleunigung, I das Trägheitsmoment und ω die Winkelgeschwindigkeit des Kreisels ist. Wenn diese (im Nenner) kleiner wird, steigt die Winkelgeschwindigkeit der Präzession. (Vgl. Roth 2016, 269f.) Das kann beobachtet werden, denn beim Verlangsamen der Rotation, beginnt der Kreisel schneller zu präzessieren. Ein weiterer Effekt ist die Nutation, die eine kleinere Rotationsbewegung der Achse darstellt und der Präzessionsbewegung überlagert ist. Sie ist in Abb. 43 deutlich zu erkennen und entsteht, wenn der Drehimpuls nicht parallel zu einer der Hauptachsen gerichtet ist, was hier wiederum auf bauliche Mängel zurückzuführen ist.

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Eine Zange erleichtert das Biegen des Drahtes. Es gehört ein wenig Übung dazu, die richtige Geometrie zu erreichen und es kommt eher auf die Position der Spitze des Kreisels, als auf dessen längere Achse an.

4.3.6 Experiment 14: Papier 8 x falten

a) Materialien

- Papier (Kopierpapier, Zeitungspapier, Seidenpapier)

b) Vorbereitung und Durchführung

Es existiert der Mythos, dass man Papier nicht öfter als siebenmal falten kann. Dieser Versuch soll hinterfragen, ob es vielleicht doch möglich ist und welche Parameter dabei eine Rolle spielen. Zuerst wird gewöhnliches Kopierpapier gefaltet - immer den Bogen in der Mitte. Das geschieht so lange, bis es zerstörungsfrei nicht mehr möglich ist. Dann wird der gleiche Vorgang mit Zeitungspapier und Seidenpapier wiederholt.

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Bei Kopierpapier gelingt das Falten sechsmal (Abb. 45), mit Zeitungspapier siebenmal (Abb. 46) und mit Seidenpapier achtmal (Abb. 47).



Abb. 45: Kopierpapier sechsmal gefaltet



Abb. 46: Zeitungspapier siebenmal gefaltet



Abb. 47: Seidenpapier achtmal gefaltet

Durch Nachmessen der Dicken, ergeben sich folgende Werte:

- Kopierpapier: 0.1 mm

- Zeitungspapier: 0.06 mm

- Seidenpapier: 0.04 mm

Dies lässt den Schluss zu, dass mit dem Falten die Verdopplung der Dicke einhergeht und die Stauchung innen, bzw. die Dehnung außen immer größer wird. Dagegen könnte man sehr große Papiere mit sehr dünnen Stärken und Papiere mit losen Fasern halten, was zu immer besseren Ergebnissen führen würde, jedoch aufgrund des exponentiellen Wachstums der Schichtdicken auch an seine Grenzen stößt.

Britney Gallivan nahm sich der Mathematik hinter dem Problem an und stellte die minimale Länge des Papiers

$$L = \frac{\pi \cdot t}{6} \cdot (2^n + 4)(2^n - 1) \tag{16}$$

mit t als Materialdicke, n der Anzahl der Faltungen (in ihrem Fall ohne das Papier nach jeder Faltung um 90° zu drehen). Somit ergibt sich eine Mindestlänge, die das Papier haben muss, um n-mal gefaltet werden zu können und keine obere Grenze.

-

¹³ Siehe: Britney Gallivan [Anm.: Folding paper in half 12 times] https://web.archive.org/web/20170119085235/http://www.pomonahistorical.org/12times.htm [21.6.2020]

4.3.7 Experiment 15: Papier zerreißen

a) Materialien

- Gummiring
- Papier
- Klebeband

b) Vorbereitung und Durchführung

Die 8 x 1 cm großen Papierstreifen werden in der Mitte eingekerbt, damit nur ein 5-mm-Steg übrig bleibt. Dann wird eine Seite mit Klebeband am Gummiring befestigt und die andere mit dem Daumen gegen die Seitenkante des Tisches gedrückt. Der Gummiring wird dann an der Tischkantenecke eingehängt und so lange gedehnt, bis der Papierstreifen reißt (Abb. 48). Das Maß der Dehnung wird genommen. Nun wiederholt man den Versuch, schneidet den Streifen jedoch quer zur Laufrichtung des Papiers aus. Der Gummiring ist zwar keine Federwaage, jedoch liefert er eine einigermaßen gleich hohe Kraftzunahme in diesen kleinen Bereichen.

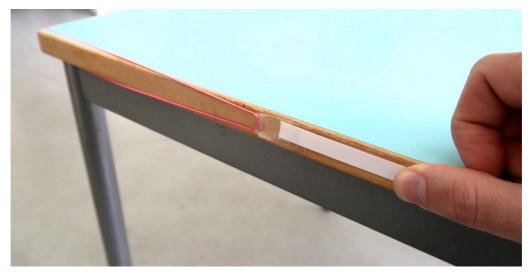


Abb. 48: Zugversuch

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Tatsächlich reißen die Streifen bei unterschiedlich hoher Zugbelastung. Mit 62 mm Auszugslänge riss der Streifen 90° zur Laufrichtung (Abb. 49), bei 69 cm riss die andere Probe und hält dabei höheren Kräften stand (Abb. 50). Die Fransen an der Bruchkante liefern außerdem

den Hinweis auf die Laufrichtung des Papier. Zackiger Verlauf entstand bei der Belastung in Laufrichtung.

Die Zugspannung σ im Gummiband kann geschrieben werden als

$$\sigma = \frac{F}{A},\tag{17}$$

wobei F die Kraft und A die Querschnittsfläche ist.

Die elastische Dehnung ε kann als Längenänderung gemessen und durch

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \tag{18}$$

berechnet werden.

Das Hookesche Gesetz liefert den Zusammenhang zwischen Dehnung und Zugspannung über den Elastizitätsmodul *E*. (Vgl. Roth 2016, 297)

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{19}$$

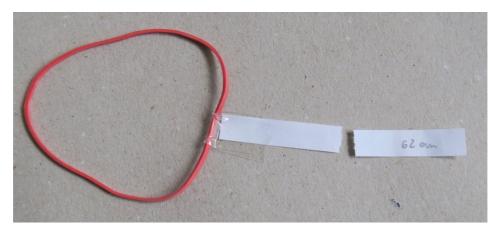


Abb. 49: Zugversuch Papier #1

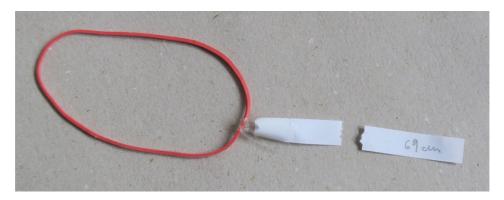


Abb. 50: Zugversuch Papier #2

Eigentlich werden Zugversuche in Prüflaboren zur Untersuchung verschiedener Werkstoffe oft wiederholt und Mittelwerte errechnet. Metalle z. B. beginnen sich teilweise vor dem Bruch stark einzuschnüren und weisen andersartiges Bruchverhalten auf als Papier, da sie eine elastische Dehnungsphase haben, bevor sie sich plastisch zu dehnen beginnen und schlussendlich brechen. Der Zugversuch stellt ein wichtiges Instrument der zerstörenden Werkstoffprüfung dar.

4.3.8 Experiment 16: Drehimpulserhaltung mit BIC-Kugelschreiber

a) Materialien

- BIC-Kugelschreiber
- 1/2 m dünne Schnur
- Papierklammer oder Radiergummi als Masse

b) Vorbereitung und Durchführung

Durch die Kappe des Kulis wird eine Schnur gefädelt, an dessen Ende die Masse gefestigt wird. Nun versetzt man die Masse in eine kreisende Bewegung und zieht nach einigen Umdrehungen an der Schnur, die aus dem oberen Ende der Kappe ragt (Abb. 51).

Durch die Verkürzung der Schnur, rotiert die Masse schneller, da der Drehimpuls erhalten bleiben muss (Abb. 52). Die Drehimpulserhaltung gilt, sobald kein äußeres Drehmoment mehr wirkt, also nicht durch Muskelkraft angetrieben wird. Der Drehimpuls \vec{L} kann geschrieben werden mit:

$$\vec{L} = I \vec{\omega} \,. \tag{20}$$

Wenn nun durch Verkürzung der Schnur das Trägheitsmoment I kleiner wird und der Drehimpuls konstant bleibt, steigt die Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$, was zur schnelleren Rotation führt, ähnlich wie bei EiskunstläuferInnen.

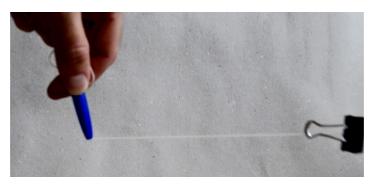


Abb. 51: Drehimpuls lange Schnur



Abb. 52: Drehimpuls kurze Schnur

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Durch Verlängern der Schnur, kann die Geschwindigkeit wieder verlangsamt werden, jedoch spielt die Reibung in der Kappe eine große Rolle und bremst die rotierende Masse.

Eine Parallele dazu stellt der Flächensatz im 2. Kepler'schen Gesetz dar: In gleichen Zeiten t werden gleiche Flächen A durchstrichen, das in Kombination mit dem Drehimpuls geschrieben werden kann als:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2m} |\vec{L}| = konst., \tag{21}$$

wobei m die Masse und L der Drehimpuls ist. Die Drehimpulserhaltung führt somit zu größeren Umlaufgeschwindigkeiten, wenn sich der Bahnradius verkleinert.

4.3.9 Experiment 17: Der Bernoulli-Kuli

a) Materialien

- 2 Bleistifte
- BIC-Kuli

b) Vorbereitung und Durchführung

Die Stifte werden laut Abb. 53 gehalten. Nun richtet man den leeren BIC-Kuli auf den Spalt (Abstand ungefähr 4 cm) und bläst in die größere Öffnung.



Abb. 53: Bernoulli-Kuli

Die beiden Bleistifte bewegen sich durch den Luftstrom aufeinander zu. Der Bernoulli-Effekt ist dafür verantwortlich. Es existiert ein Zusammenhang zwischen der Fließgeschwindigkeit und dem statischen Druck p_{stat} . (Vgl. Roth 2016, 358)

$$p_{stat} + \frac{1}{2}\rho v^2 = konst. \tag{22}$$

Die Summe aus statischem und dynamischem Druck ist konstant. Durch die Strömungsgeschwindigkeit v eines Mediums mit der Dichte ρ kommt es zum Anstieg des dynamischen und dadurch zum Sinken des stat. Drucks, weshalb sich die beiden Bleistifte aufeinander zubewegen.

4.3.10 Experiment 18: Der Bernoulli-Venturi-Kuli

a) Materialien

- BIC-Kuli
- Kerze

b) Vorbereitung und Durchführung

Durch den leeren BIC-Kuli wird von beiden Seiten, aus einer Entfernung von einigen Zentimetern versucht die Kerze auszublasen. Abb. 54 zeigt die Anordnung.

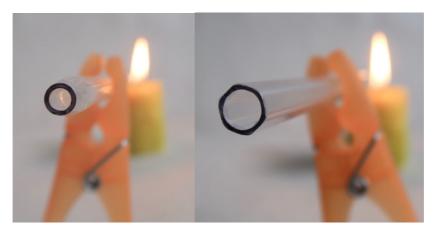


Abb. 54: Bernoulli-Ventouri-Kuli (Kerze kann nur im rechten Bild ausgeblasen werden)

Das Paradoxe an dem Versuch ist, dass zwar der Austrittsquerschnitt unterschiedlich ist, jedoch auch der Eintrittsquerschnitt. Erneut kann hier die Bernoulli-Gleichung (Formel 22) herangezogen werden. Ist der statische Druck im Mundraum immer gleich hoch anzunehmen, verändert sich die Strömungsgeschwindigkeit mit dem Austrittsdurchmesser des Rohrs. Der dynamische Druck ist damit höher, wenn bei kleinerem Durchmesser die Strömungsgeschwindigkeit steigt und die Kerze erlischt, wenn ihr der kleinere Durchmesser zugewandt ist. Um diesen Effekt zu übertreiben, kann auch durch einen Bic-Kuli-Stoppel geblasen werden.

Der Effekt kann auch mit Hilfe des Venturi-Effekts erklärt werden. Es gilt für den vereinfachten Fall der Massenerhaltungssatz:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v = konst, \tag{23}$$

wobei \dot{m} der Massenstrom, ρ die Dichte, A der Austrittsquerschnitt und v die Austrittsgeschwindigkeit sind. Bei geringerem Querschnitt steigt demzufolge die Geschwindigkeit. (Vgl. Sigloch 2014, 69)

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Für inkompressible Fluide gilt das Kontinuitätsgesetz:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{v_2}{v_1},\tag{24}$$

das ein das Verhältnis der Strömungsquerschnitte mit dem Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeiten gleichsetzt.

4.3.11 Experiment 19: Der rollende Bleistift

a) Materialien

- Bleistift
- Buch oder Karton

b) Vorbereitung und Durchführung

Die Ebene wird um 20° geneigt und der Bleistift am oberen Ende losgelassen (Abb. 55).

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Der Stift beginnt zu rollen und beschleunigt, bis er unten ankommt. Um seine Geschwindigkeit berechnen zu können, kann die Energie oben

$$E_{oben} = mgH (25)$$

mit der Energie unten

$$E_{unten} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \tag{26}$$

gleichgesetzt werden. m bezeichnet die Masse, v die Geschwindigkeit, I das Trägheitsmoment, H die Starthöhe und r den Durchmesser des Stifts. Die Rollbedingung mit $v = \omega r$ kann eingesetzt werden:

$$mgH = \frac{1}{2}v_{max}^2\left(m + \frac{I}{r^2}\right). \tag{27}$$

Daraus ergibt sich das Quadrat der maximalen Geschwindigkeit unter dem Einsetzen vom Trägheitsmoment für Vollzylinder $(I = \frac{1}{2}mr^2)$ zu

$$v_{max}^2 = 4gH. (28)$$

Damit kann die Geschwindigkeit berechnet werden. Mit einer Starthöhe von 5 cm ist

$$v_{max} \approx 1.4 \frac{m}{s}. \tag{29}$$

Das Interessante ist, dass alle Terme bis auf die Höhe wegfallen, solange der Bleistift rollt!



Abb. 55: Bleistift auf schiefer Ebene

Wichtig für diesen Versuch ist, dass der Winkel der Fläche nicht zu groß ist, da das Rollen in ein Rutschen übergeht.

Ausgebaut kann das Experiment werden, indem man die Rollweite in der Ebene misst und gegebenenfalls einen eckigen Stift verwendet.

4.3.12 Experiment 20: Die Wassersäule und der Springbrunnen

a) Materialien

- BIC-Kugelschreiber
- Wasser

b) Vorbereitung und Durchführung

Es wird die durchsichtige leere Schreiber-Hülle auf der engen Seite mit einem Papierstopfen dicht verschlossen. Dann wird er mit Wasser befüllt (hier blau eingefärbt) und man hält die obere Öffnung zu, sobald das Wasser bis zum Rand gestiegen ist. Nun gibt man die obere Öffnung frei. Der Stift besitzt ein winziges Loch in der Mitte, aus dem das Wasser fließen kann.

Zwei Phänomene sind zu beobachten. Es passiert meist, dass die Wassersäule nur vom winzigen Loch in der Mitte aufwärts steht (Abb. 56). Sobald man oben die Öffnung freigibt, strömt das Wasser aus dem kleine Loch in der Mitte und verringert ihre Reichweite kontinuierlich, bis fast das gesamte Wasser ausgetreten ist. Nun stellt sich die Frage, warum es manchmal dazu kommt, dass beim Befüllen die Wassersäule nur über der kleinen Öffnung steigt. Die Erklärung dafür ist, dass sich durch das Loch im oberen Bereich ein Druckausgleich ergibt, der darunter nicht stattfinden kann, weil dieser verschlossen ist. Außerdem fungiert die einfließende Flüssigkeit als Dichtung, der die unter ihm liegende Luft komprimiert.

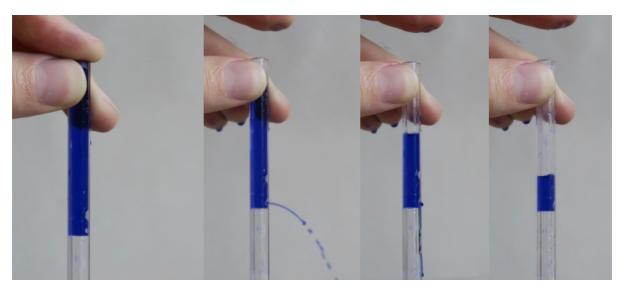


Abb. 56: Wassersäule und Springbrunnen

4.3.13 Experiment 21: Papier an der Scheibe - Adhäsionskräfte

a) Materialien

- Papier
- Zirkelspitze
- Wasser
- glatte Oberfläche

b) Vorbereitung und Durchführung

Zwei Blätter Papier werden mit Wasser benetzt und an eine Fensterscheibe glatt angepresst. In ein Papier wurden zuvor viele kleine Löcher gestochen.

Beide Blätter bleiben haften und lösten sich erst nach längerer Zeit bzw. unter zusätzlicher Krafteinwirkung vom Glas (Abb. 57 und Abb. 58). Die zwischen Wasser und Glas bzw. Wasser und Papier wirkenden Adhäsionskräfte sind dafür verantwortlich. Durch den kleiner Wirkungsbereich mit einem Radius von < 10⁻⁸ m, lösen sich die Stoffe bei größeren Abständen, die durch Kräfte oder das Eindringen von Flüssigkeiten oder Gasen entstehen. Zwischen Wasser und Glas bzw. Wasser und Papier überwiegen die Adhäsionskräfte, weshalb eine Benetzung auftritt. (Vgl. Sigloch 2014, 12) Das zweite, durchlöcherte Blatt dient zur Kontrolle, damit der Luftdruck als Ursache für die Haftwirkung ausgeschlossen werden kann. Würde dieser das Papier ans Glas drücken, käme es zu einem Druckausgleich und das Papier würde sich lösen. Es fallen beide Blätter jedoch erst, wenn die Feuchtigkeit durch Verdunstung soweit sinkt, dass kein Flüssigkeitsfilm mehr zwischen den Medien existieren kann. Die Kräfte lassen nach, das Papier beginnt sich zu verformen und löst sich (Abb. 59).

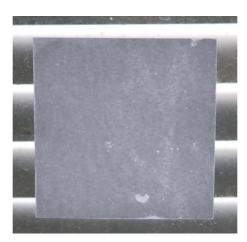


Abb. 57: Nasses Papier an der Scheibe

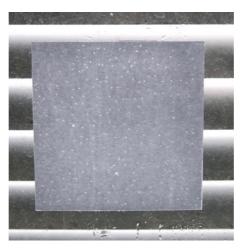


Abb. 58: Nasses Papier mit Löchern an der Scheibe

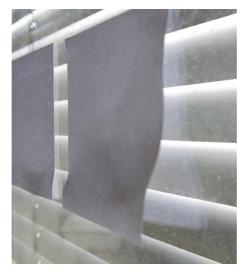


Abb. 59: Papier beginnt sich zu lösen

Adhäsionsfolien nutzen diesen Effekt. Durch ihre "gummi-artige" Konsistenz können sie sich gut an unebene Oberflächen anpassen und haften bleiben.

4.4 Wärmelehre

4.4.1 Experiment 22: Die sich krümmenden Papier-Streifen

a) Materialien

- Seidenpapier

b) Vorbereitung und Durchführung

Ein 2 x 1 cm großes Stück Seidenpapier wird auf die Fingerkuppe gelegt, nach einigen Sekunden gewendet (Abb. 60).

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Der Streifen wölbt sich binnen weniger Sekunden nach oben. Wenn man ihn wendet, passiert dies erneut in die Gegenrichtung. Genauer betrachtet, krümmt er sich in der kürzeren Querachse.



Abb. 60: Seidenpapier Wärme

Gegenstände dehnen sich bei Erwärmung aus. Die Wärme der Fingerkuppe diffundiert in die Oberfläche des Papiers. Nachdem der Streifen nur in einigen Punkten in seiner Mitte an der Haut anliegt, erwärmt die Wärmestrahlung nicht das gesamte Papier gleichmäßig, was zu keiner Krümmung führen würde. Die Krümmung nach oben kann erklärt werden, da sich die Unterseite aufgrund der Wärme ausdehnt. Durch den Längenausdehnungskoeffizienten α , kann die Dehnung ΔL beschrieben werden.

$$\Delta L = \alpha \Delta T L \tag{30}$$

Dabei entspricht ΔT der Temperaturdifferenz und L der ursprünglichen Länge. Zusätzlich zur Wärme trägt die Feuchtigkeit zum Aufquellen des Papier bei. Dies hat auch eine Ausdehnung zur Folge, jedoch kann der Versuch an einer trockenen Herdplatte ebenso erfolgreich durchgeführt werden.

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Für Brücken wird die Dehnung bei Temperaturunterschieden berücksichtigt, indem einige Zentimeter breite Lücken gelassen werden. Auch im Maschinenbau wird bei der Konstruktion von z. B. Tragwerks-Auflagern ein Festlager mit einem Loslager gepaart, damit es bei Ausdehnung nicht zu unerwünschten Spannungen kommt.

4.4.2 Experiment 23: Der "Bi"-Papierstreifen

a) Materialien

- Papier
- Kleber

b) Vorbereitung und Durchführung

Zwei 1 cm breite und 21 cm lange Papierstreifen werden an den Enden zusammengeklebt. Nach dem Aushärten des Klebers, stellt man den Doppelstreifen auf den Tisch und atmet die Seitenfläche der Streifen an (Abb. 61 und Abb. 62).

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Das Ergebnis ist, dass sich das Streifen-Paar krümmt. Wenn es gewendet wird, krümmt es sich in die andere Richtung. Die Wärmeausdehnung sowie die eingebrachte Feuchtigkeit führen zu Kräften, die den Streifen krümmen. Er biegt sich in die Ausgangsposition, wenn etwas Zeit verstrichen ist.



Abb. 61: Papierstreifen Seite 1



Abb. 62: Papierstreifen Seite 2

Eine praktisches Beispiel dazu ist Bimetall. Die Kombination zweier Metalle mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten führt zu einer Krümmung, die für Messinstrumente (spiralförmig angeordnet) verwendet wird. Es werden Bimetalle für Thermostate als Schaltelement verbaut oder auch in blinkenden Lampen. Hier wird der Kontakt unterbrochen, sobald sich die Lampe durch die Strahlung erhitzt und wieder verbunden, wenn der Bimetallstreifen abgekühlt ist, wodurch ein kontinuierliches Blinken der Lampe entsteht.

4.4.3 Experiment 24: Ab wann verschwindet die Tinte eines Friction-Stifts?

a) Materialien

- Stift, dessen Farbe durch Reibung gelöscht werden kann
- Feuerzeug
- Papier
- Thermometer (Einstichthermometer)

b) Vorbereitung und Durchführung

Mit dem Stift werden einige Linien auf das Blatt gezeichnet und das Thermometer direkt darunter gehalten. Die Flamme des Feuerzeuges bewegt man langsam von unten kommend immer näher an das Blatt und misst die Temperatur, bis die Farbe des Stifts verschwindet (Abb. 63). Dieser Vorgang sollte mehrmals wiederholt werden, da die Temperatur sehr stark schwanken kann.



Abb. 63: Messung Friction-Stift-Farbe

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Tabelle 2 liefert den Mittelwert der Temperaturmessung.

Tabelle 2: Friction-Stift Temperaturmessung

| Messung | Temperatur T/°C |
|---------|-----------------|
| 1 | 56 |
| 2 | 45 |
| 3 | 47 |
| 4 | 55 |
| 5 | 52 |
| $ar{T}$ | 51 |

Damit ergibt sich eine durchschnittliche Temperatur von 51°C, bei der die Farbe des Stifts zu verblassen beginnt bzw. gänzlich verschwindet. Diese Temperatur muss durch Reibungswärme beim Radieren überschritten werden.

Die Temperatur ist an dem Punkt gemessen worden, an dem die Tinte zu verblassen beginnt. Es passiert jedoch, dass die Farbe nach kurzer Hitzeeinwirkung wieder erscheint. Die chemische Zusammensetzung der Tinte ist leider nicht bekannt.

4.4.4 Experiment 25: Die Fineliner-Kanone

a) Materialien

- Fineliner
- Tintenpatrone
- Papier
- Stößel aus Papier oder Bambusspieß

b) Vorbereitung und Durchführung



Abb. 64: Kanone vor dem Zusammenbau

Der Fineliner wird an beiden Enden geöffnet und sein Innenleben entfernt. Dann wird an einem Ende ein nasser Papier-Stopfen eingesetzt. In das andere Ende wird eine leere, aufgeschnittene Tintenpatrone (ohne Kugel) mit der kleinen Öffnung gesteckt und diese mit einem kleinem "Papier-Wuzerl" als Projektil dicht verschlossen (Abb. 65). Nun schiebt man den Stopfen mit Schwung durch die Röhre (Abb. 66).



Abb. 65: Kanone vor dem Schuss



Abb. 66: Kanone nach dem Schuss

Das Projektil verlässt die Patrone mit einem Knall. In der Mündung ist Nebel zu sehen. Es tauchen viele physikalische Phänomene gleichzeitig auf, die nach der Reihe angesprochen werden sollen. Zuerst zum Geschoß: Da seine Masse m sehr gering ist, bleibt die kinetische Energie klein.

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} \,. \tag{31}$$

Die Geschwindigkeit v nimmt aufgrund des hohen Luftwiderstands nach dem Austreten schnell ab und somit sinkt auch die Energie rasch. Zum Prinzip des Aufbaus: Der Druck im Inneren des Fineliners steigt durch Kompression. Dies geschieht jedoch nicht linear. Die schnelle Kompression des Volumens V (kein Austausch der Wärme mit der Umgebung möglich) führt zur *Poisson'schen Gleichung* für adiabatische Zustandsänderungen. (Vgl. Lüders 2012, 453)

$$pV^{\kappa} = const. \tag{32}$$

Der Druck p erhöht sich, wie aus Abb. 67 hervorgeht, nicht linear.

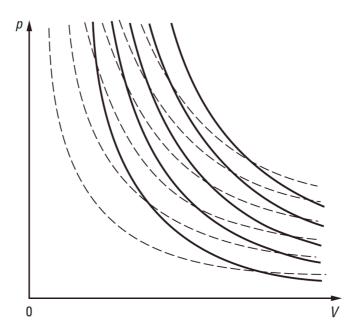


Abb. 67: Adiabaten (durchgezogene Linien) und Isothermen eines idealen Gases (Lüders 2012, 453)

Nebel entsteht, wenn sich der Luftdruck plötzlich ausgleicht (adiabatische Expansion). Dadurch sinkt die Temperatur dermaßen schnell ab, dass die im Inneren des komprimierten Gases enthaltene Feuchtigkeit zu Nebel kondensiert. Nach einigen Sekunden verschwindet dieser aufgrund der Angleichung an die Umgebungswärme wieder. (Vgl. Lüders 2012, 453)

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Auch wenn die kinetische Energie des Kügelchens wegen seiner kleinen Masse gering sein mag, ist dennoch Vorsicht geboten, da hohe Projektil-Geschwindigkeiten in Mündungsnähe auftreten.

Als weiteres Beispiel der adiabatischen Zustandsänderung können Fahrradpumpen betrachtet werden. Das Gehäuse erwärmt sich nach einigen Pumpvorgängen spürbar. Nebel entsteht auch beim schnellen Öffnen von Mineralwasserflaschen. Schallschwingungen sind ebenso adiabatische Prozesse (vgl. Formel 32).

4.5 Auftrieb

4.5.1 Experiment 26: Schwimmende Büroklammer

a) Materialien

- Büroklammer
- Glas mit Wasser (zur besseren Sichtbarkeit eingefärbt)

b) Vorbereitung und Durchführung

Die Klammer wird vorsichtig in das Wasserbecken gelegt (Abb. 68). Dabei ist darauf zu achten, dass sie zuvor nicht vollständig benetzt wurde.



Abb. 68: Büroklammer schwimmt im Wasser

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Die Klammer liegt auf der Wasseroberfläche und drückt diese stark ein. Geringste Erschütterungen würden sie sinken lassen. Verantwortlich für diesen Effekt ist die Oberflächenspannung. Die Kräfte auf Moleküle im Inneren der Flüssigkeit sind ausgeglichen. Am Übergang zum Gas (Oberfläche) fällt jedoch der Betrag einiger Kompressionskräfte geringer aus und

die Moleküle stoßen sich stärker ab, was zu einer permanenten Spannung führt (Abb. 69). Zusätzlich wirkt sich ein Temperaturanstieg negativ auf die Oberflächenspannung aus. Es wechseln die Atome an der Oberfläche in die Gasphase. Bei Siedetemperatur ist die Oberflächenspannung Null, und der Dampfdruck gleich dem Umgebungsdruck.

Bei Wasser ist die Benetzung am Rand des Glases nach oben - im Unterschied zu flüssigem Quecksilber (Abb. 69). Wenn die Kohäsion (Kräfte zwischen gleichen Teilchen) größer als die Adhäsion (Kräfte zwischen verschiedenartigen Teilchen) ist, benetzt das Fluid nicht, umgekehrt schon (wie bei Wasser, Abb. 70a). Die Kapillarwirkung in Bezug auf Wasser lässt dieses die Wände hochsteigen, bei Quecksilber tritt aufgrund der starken Kohäsionskräfte sogar eine Kapillar-Depression auf. (Vgl. Sigloch 2014, 12f.)

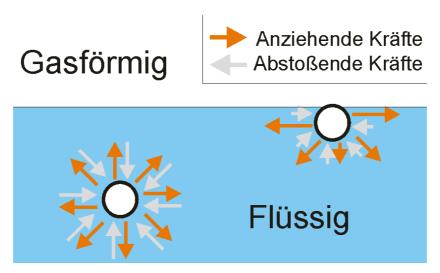


Abb. 69: Oberflächenspannung (Wikipedia "Oberflächenspannung" 2020)

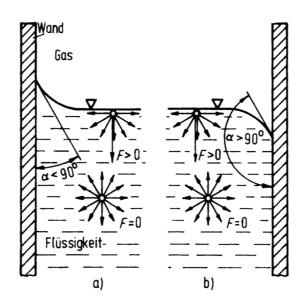


Abb. 70: Randwinkel bei Flüssigkeiten an festen Wänden (Sigloch 2014, 12)

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Einfacher funktioniert das Experiment mit kleineren Klammern, da sie leichter sind und ihre Oberfläche im Vergleich zur Masse größer. Oder man verwendet ein Stück Seidenpapier, auf das man die Klammer legt. Diese saugt sich nach einiger Zeit voll und geht unter. Die Klammer bleibt jedoch schwimmend zurück.

4.5.2 Experiment 27: Papierspirale über Kerze

a) Materialien

- Papier
- Kerze
- kurzen Faden
- Zirkel
- 2 Heftklammern

b) Vorbereitung und Durchführung

Die Papierspirale wird laut Abb. 71 angefertigt. In der Mitte wird der Faden befestigt, sodass man beim Anheben eine Abwärtsspirale erhält (Abb. 72). Eine Heftklammer am unteren Ende lässt dieses absinken. Die Spirale sollte am Faden im Abstand von ungefähr 10 cm mittig über der Kerze oder alternativ über eine Heizung gehalten werden.



Abb. 71: Zuschnitt Papierspirale



Abb. 72: Papierspirale hängend

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Sobald die Spirale über der Flamme ist, beginnt sie sich zu drehen als würde sie sich nach unten schrauben. Dies passiert, da die heiße Luft durch Konvektion schnell aufsteigt und die Spirale anströmt. Konvektion ist eine von drei Wärmeübergängen, die durch Teilchenströme erzeugt wird. Will man sie unterbinden, muss ein unüberwindbares Hindernis zwischen die Zonen bewegt werden. Die anderen beiden möglichen Wärmetransporte finden durch Strahlung bzw. Wärmeleitung statt. Strahlung geht von jedem Körper je nach Eigentemperatur unterschiedlich stark aus, wobei die abgestrahlte Leistung mit der vierten Potenz der Temperatur ansteigt (Stefan-Boltzmann-Gesetz). Sie kann durch eine Reflexion unterbunden werden. Wärmeleitung als dritte Möglichkeit tritt innerhalb eines Körpers oder an Grenzflächen zwischen zwei Körpern auf und endet bei Unterbrechung der Medien. (Vgl. Roth 2016, 549-556)

Die Flächen lenken den Luftstrom ab und erhalten dadurch eine horizontale Kraftkomponente, die für die Drehbewegung sorgt. Konvektion entsteht durch Dichteunterschiede in der Luft. Erwärmte Luft ist leichter und steigt daher auf. Die von unten nachströmende Luft gleicht den entstehenden Unterdruck sofort aus. (Vgl. Lüders 2012, 461)

Sobald man die Kerze entfernt, setzt eine Gegenbewegung ein, da der Faden die ihm auferlegte Torsionsspannung als eine Art Torsionsfeder wieder abgeben will.

Bei längerer Beobachtung, im Raum positioniert, bewegt sich die Spirale ständig etwas in beide Richtungen, was durch leichte Luftbewegungen durch z. B. Heizung, gekipptes Fenster usw. zu erklären ist.

4.5.3 Experiment 28: Auftrieb der Papierschachtel - Münzen wiegen

a) Materialien

- Papier
- Klebeband und Klebstoff
- Wasserwanne mit Seifenwasser
- Lineal
- Testmasse (4 x 1-Euro-Münzen)

b) Vorbereitung und Durchführung

Die Schachtel wird laut Abb. 73 gefaltet, zusammengeklebt, mit Klebeband überzogen und mit Punkten im 1-mm-Abstand beschriftet. Die Außenmaße des Papiers sind 90 x 90 mm, der Boden der Schachtel hat 65 x 24 mm. Es wird entlang der eingezeichneten Linien aufgefaltet und damit die Schachtel erzeugt. Im Wasserbad wird nun abgelesen, wie tief sie eintaucht. Dann werden zuerst zwei Münzen (gleichmäßig verteilt) und später vier Münzen als Masse in die Schachtel gelegt (Abb. 76).



Abb. 73: Bauanleitung Schachtel

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

In Abb. 75 ist mit der Masse zweier Münzen eine Eintauchtiefe von 9,5 mm zu erkennen. Mit vier Münzen sind es 19 mm. Die Eintauchtiefe für die leere Schachtel ist aufgrund der Oberflächenspannung vernachlässigbar klein. Da der Auftrieb dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit entspricht, lässt sich so errechnen, wie viel eine Münze wiegt.

$$F_A = \rho_{Fl} V_{verdr\ddot{a}ngt} g \tag{33}$$

Die Auftriebskraft F_A setzt sich aus der Dichte der Flüssigkeit ρ_{Fl} , dem verdrängten Volumen und der Erdbeschleunigung g zusammen. Wenn man die gemessenen Werte und für das Volumen

$$V_{verdrängt} = (9.5 \cdot 24 \cdot 65) \cdot 10^{-9} \text{m}^3 \text{ einsetzt},$$
(34)

gelangt man zu einer Auftriebskraft von $F_A = 0.148$ N, bzw. der Masse pro Münze von $m_M = 7.41$ g, was eine gute Näherung zu den online recherchierten Werten von 7.5 g darstellt.



Abb. 74: Papierschachtel ohne Massen

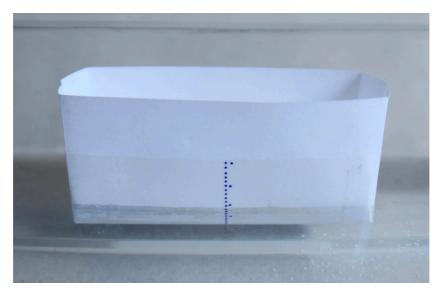


Abb. 75: Papierschachtel mit 2 x 1 Euro



Abb. 76: Papierschachtel mit 4 x 1 Euro

4.5.4 Experiment 29: Wann kippt ein Schiff aus Papier

a) Materialien

- Papier
- Klebeband und Klebstoff
- Zusatzmassen (2 Münzen)
- Wasserwanne mit Seifenwasser, um die Oberflächenspannung zu reduzieren

b) Vorbereitung und Durchführung

In das Modell aus obigem Versuch wird eine Papierrolle geklemmt, um die Münzen stehend befestigen zu können. Dies hat den Zweck, dass der Schwerpunkt gleichmäßig hoch gelagert werden kann (Abb. 77). Dann wird einer Kante entlang eine 1-mm-Skalierung markiert und die Schachtel zu Wasser gelassen.



Abb. 77: Schachtel kippen

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Es ergibt sich ein vollkommen anderes Bild, als im Vorversuch. Der schwimmende Körper kippt zur Seite und verharrt in seiner neuen Position (Abb. 78). Dies geschieht, weil sein Tauchvolumenmittelpunkt F_S unter dem Massenschwerpunkt F_A liegt, der Körper sehr labil ist und er durch kleinste Bewegungen zu kippen beginnt, da der Tauchvolumenmittelpunkt seine Position ändert. Es sind dann zwei neue, stabile Positionen möglich (entweder in die eine oder die andere Richtung). Die beiden Punkte müssen sich lotrecht übereinander befinden. Bei einer Auslenkung entsteht ein Drehmoment, da sich der Mittelpunkt des eintauchenden Volumens verändert (Abb. 79c). Dieses dreht den Körper wieder zurück in die stabile Position. Abb. 78 veranschaulicht das.

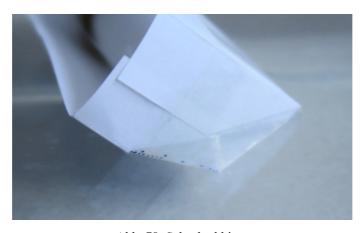


Abb. 78: Schachtel kippt

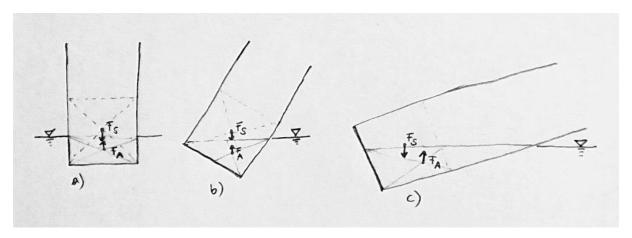


Abb. 79: Schwimmende Schachtel, Kräfte

Die beiden Kräfte F_S und F_A sind immer gleich groß und vertikal orientiert. Fall b) in Abb. 79 zeigt den stabilen Fall, wenn beide Kräfte vertikal übereinanderliegen.

4.6 Aerodynamik

4.6.1 Experiment 30: Ruder

e) Materialien

- Papier
- Draht
- Kleber

f) Vorbereitung und Durchführung

Es wird aus Papier der in Abb. 80 zu sehende Flieger gebaut, um das Flugverhalten zu untersuchen. Dazu entstehen der Rumpf aus einer Papierrolle, die Leitwerke aus dünnen Papierstreifen und die Tragflächen sind aus gewölbten und an der Hinterkante zusammengeklebten Papierstreifen angefertigt. Das Flügelprofil spielt für diesen Versuch aber keine große Bedeutung. Durch die Faltung entsteht lediglich eine spitze Profil-Nase und eine Biegefestigkeit über die Länge. Die Unterseite der Fläche wird aus drei Lagen Papier geklebt und die Oberseite nach hinten unter leichtem Biegen umgefaltet, sodass sie sich im Gegensatz zur Unterseite wölbt.

Der Draht wird so lange entlang des Rumpfs verschoben, bis ohne Ruderkorrekturen ein Gleitflug möglich ist. Gleitflug entsteht, wenn ein Gleichgewicht zwischen resultierender Profilkraft und Flugzeug-Schwere (Gewichtskraft) existiert. (Vgl. Sigloch 2014, 339)

$$F_{Res} = F_G \tag{35}$$

Dann werden jeweils Höhen- oder Seitenruder in bestimmte Positionen gebracht und das Flugverhalten beobachtet.



Abb. 80: Papierflieger Ruder

g) Ergebnis & physikalische Erklärung

Zeigt das Höhenruder nach oben (Abb. 81), steigt der Flieger an, da der Ruderausschlag für die Luftströmung ein Hindernis ist und eine Kraft ausübt, die ein Moment um den Schwerpunkt erzeugt, weshalb das Flugzeug nach hinten zu kippen beginnt. Zeigt das Höhenruder nach unten (Abb. 82), tritt der gegenteilige Effekt auf und das Heck des Flugzeugs hebt sich, da die Anströmung eine Kraft von unten erzeugt. Beim Seitenruder-Ausschlag (Abb. 83) dreht sich das Flugzeug um die vertikale Achse. Zeigt es nach rechts, wirkt eine Kraft und das Heck dreht nach links, wodurch der Flieger einer Kreisbahn nach rechts folgt.

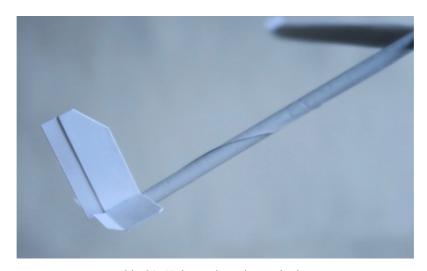


Abb. 81: Höhenruder zeigt nach oben

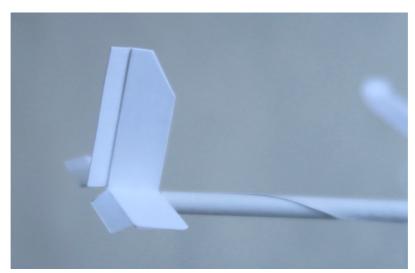


Abb. 82: Höhenruder zeigt nach unten

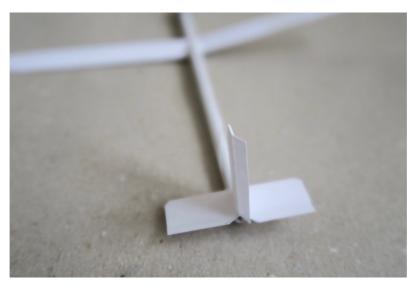


Abb. 83: Seitenruder zeigt nach rechts

h) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Bei vielen Flugzeugen existiert zusätzlich ein Querruder, das sich in den Tragflächen befindet, damit eine Rotation über die Längsachse möglich wird. Bei Kurven-Manövern wird das Querruder gemeinsam mit dem Seitenruder ausgelenkt. Ruderauslenkungen manipulieren die Richtung der Strömung und sollten niemals so groß sein, dass ein Strömungsabriss durch Ablösung entsteht, da das Flugzeug dadurch manövrierunfähig werden kann. Es gibt außerdem unterschiedliche Bauweisen von Leitwerken. So können sie nicht nur am hinteren Ende von Flugzeugen, sondern auch vorne angebracht sein (Abb. 84).



Abb. 84: Höhenruder vorne (https://fscaschaffenburg.de/popupseiten/flugzeugsteuerung-4/ [Stand: 30.05.2020])

4.6.2 Experiment 31: Schwerpunkt Fliegen

a) Materialien

- Papier
- Klebstoff
- Tintenpatrone (als Masse)

b) Vorbereitung und Durchführung

Es wird ein neues Flugzeug gebaut, um die Position des Schwerpunkts genauer zu untersuchen. Dabei ist die Tragfläche mit einem Gummiring am Rumpf befestigt und verschiebbar. Als Masse im Inneren des Rumpfs fungiert eine Tintenpatrone.

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Beim Werfen des Gleiters ohne Zusatzmasse bemerkt man sofort, dass die starke Auftriebskraft des Flügels das Flugzeug nach hinten kippen lässt und der Schwerpunkt zu weit hinten liegt (Abb. 85)¹⁴. Wenn nun ins vordere Ende eine Tintenpatrone gesteckt wird, verlagert sich dieser nach vorne (Abb. 86) und ein stabiler Gleitflug ist möglich (siehe Formel 35).

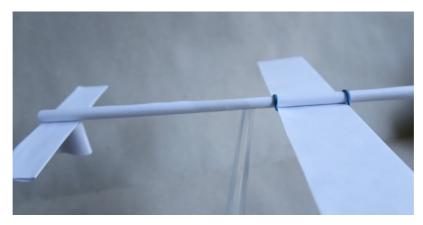


Abb. 85: Schwerpunkt ohne Masse

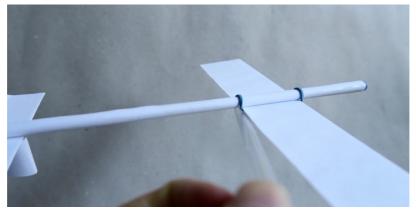


Abb. 86: Schwerpunkt an hinterer Tragflächenkante

4.6.3 Experiment 32: Die Tragfläche

a) Materialien

- Papier
- Klebstoff
- 50 cm langer, dünner Faden
- Föhn

-

¹⁴ Anm.: Die Messung musste aus technischen Gründen mit den Tragflächen nach unten vorgenommen werden. Für das Ergebnis spielt dies keine Rolle.

b) Vorbereitung und Durchführung

Eine prototypische Tragfläche wird mit zwei eingebauten Führungs-Rohren an Schnüren einer Strömung ausgesetzt, in der sie sich vertikal bewegen kann. Das Modell nimmt eine unendlich breite Tragfläche an und spart dadurch die Kräfte an den Enden aus der Betrachtung aus. Zum Sichtbarmachen der Anströmung werden an der Oberseite Fäden angebracht (Abb. 87).

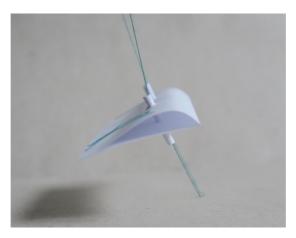


Abb. 87: Tragflächenprofil

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Die Tragfläche hebt sich unter Anströmung und steigt an den Fäden empor, solange sie sich in der Strömung befindet. Durch Neigung um die horizontale Achse kann die Steighöhe beeinflusst werden. Dabei tritt an der Hinterkante der Tragfläche bei kurzer Anströmung ein Anfahrwirbel auf (Abb. 88), der mit der Strömung nach hinten wegschwimmt. Es lösen sich im weiteren Verlauf, also unter kontinuierlicher Strömung laufend kleine Wirbel ab, die sich aufgrund der Reibung und Überlagerung mit einer Zirkulationsbewegung um den Flügel zu einem dynamischen Auftrieb ergeben. Die kleinen Wirbel können als Trennfläche verstanden werden (Abb. 89). (Vgl. Sigloch 2014, 336f.)

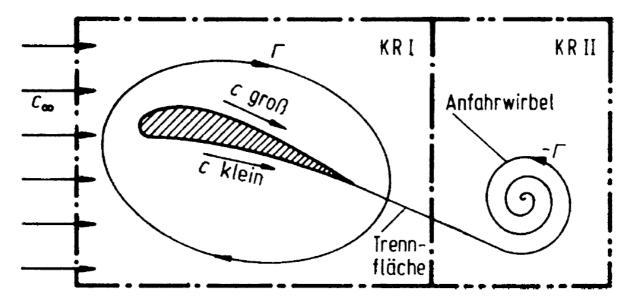


Abb. 88: Anfahrwirbel (Sigloch 2014, 337)

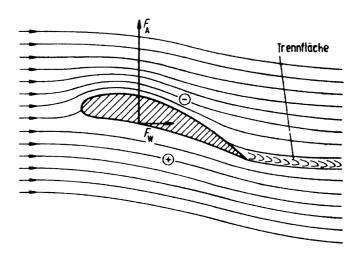


Abb. 89: Trennfläche (Sigloch 2014, 337)

Die Überlagerung der Zirkulation mit der Strömung ergibt unterschiedliche Profilumströmungen (Abb. 90) und kann zu gering (a), mit richtiger Abströmung an der Hinterkante (b) und zu groß (c) sein.

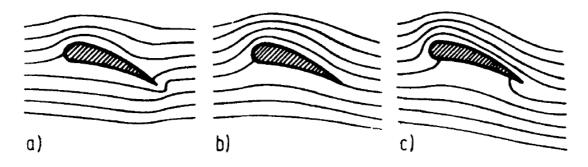


Abb. 90: Stromlinienverläufe (Sigloch 2014, 337)

Dabei entsteht ein Unterdruck an der Oberseite, ein Überdruck an der Unterseite der Tragfläche, wobei der Überdruck nur etwa 1/3 bis 1/4 zum Gesamtauftrieb beiträgt, was in Abb. 91 gut erkennbar ist. Die Sogwirkung an der Oberseite entsteht aufgrund höherer Geschwindigkeiten, weshalb der stationäre Druck sinkt. Gekoppelt mit der Zirkulation um die Tragfläche, die durch den Anstellwinkel entsteht, kommt es zum Auftrieb. Auch ohne speziellem Profil, würde es diesen geben, jedoch trägt das Profil zu einer optimalen aerodynamischen Wirkung bei. Je runder die Nase, umso variabler ist der Anstellwinkel (vgl. Sigloch 2014, 338).

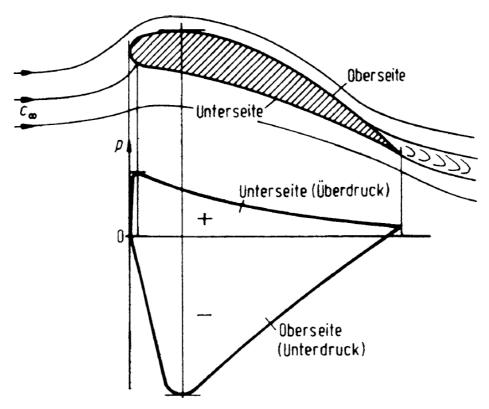


Abb. 91: Druckverteilung Tragfläche (Sigloch 2014, 338)

Die Fäden zeigen an, ob es Strömungsabrisse an der Tragfläche gibt (Abb. 92). Im Segelsport werden Fäden paarweise an beiden Seiten des Segels angebracht, um zu überprüfen, ob es zu Strömungsabrissen kommt und die Anstellung des Segels korrigiert werden muss.

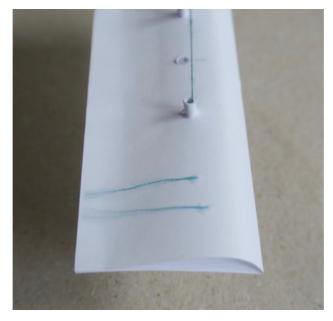


Abb. 92: Strömung an der Tragfläche

Welch starken Einfluss der Anstellwinkel α auf den Auftrieb hat, zeigt folgende Grafik.

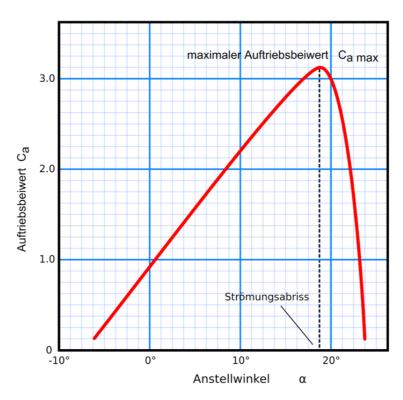


Abb. 93: Strömungsabriss (Wikipedia "Strömungsabriss" 2020)

4.6.4 Experiment 33: Luftwiderstand oder wie man Papier auf über 75 km/h beschleunigt

a) Materialien

- 2 x DIN A5 Papier
- dünner Zwirn
- Klebeband
- Bleistift
- Timer

b) Vorbereitung und Durchführung

Um die Rolle der Luftverwirbelungen in Luftwiderstandsbeiwerten spürbar zu machen, werden zwei Gegenstände gleicher projizierender Fläche (Abb. 94) hohen Windgeschwindigkeiten ausgesetzt. Damit dies gelingt, hängt man beide Objekte an Fäden mit einer Länge von 1 m (Abb. 95 und Abb. 96) und schwingt sie vertikal mit physisch maximal möglicher Rotationsgeschwindigkeit für eine festgelegte Zeit (20 Sekunden) und zählt die Umläufe. Es sollte sich herausstellen, dass man die aerodynamischere Form häufiger rotieren lassen kann. Um die Gefahr zu minimieren, dass Personen oder Gegenstände zu Schaden kommen, empfiehlt es sich, auf die Schwing-Richtung Acht zu geben. Das überschüssige Material beim Papierkegel wird in dessen Spitze gepresst.

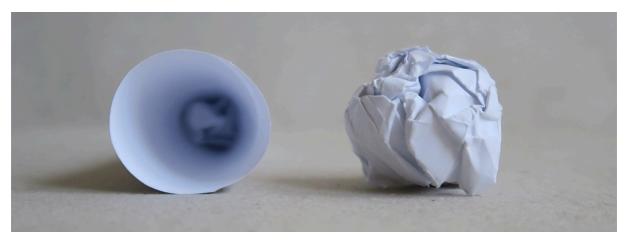


Abb. 94: Luftwiderstand

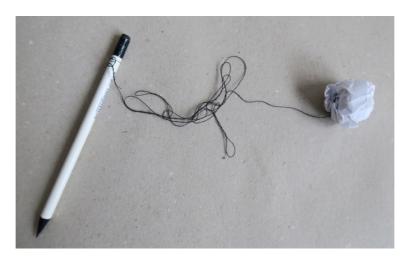


Abb. 95: Papierkugel Luftwiderstand



Abb. 96: Papierkegel Luftwiderstand

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Es fällt beim Schwingel der Kugel sofort auf, dass diese zu Rotieren beginnt und die Schnur dabei um etwa 4 cm verkürzt wird, was jedoch vernachlässigbar ist. Die Kugel rotiert in 20 Sekunden 58 mal, der Kegel schafft es auf 68 Umdrehungen. Am Sound kann man außerdem erkennen, dass die Kugel wesentlich mehr Reibung zu haben scheint und der Kegel durch seine Form viel besser durch die Luft gleiten kann. Die Bahngeschwindigkeit des Papierkegels lässt sich mit

$$v = \omega \cdot r = 2\pi f \cdot r \tag{36}$$

berechnen, wobei als Frequenz f=204 U/min und für den Radius r=1 m eingesetzt wird. Somit ist seine Bahngeschwindigkeit 21.3 m/s bzw. 77 km/h. Es muss zwischen laminarer Schichtströmung und turbulenter Wirbelströmung unterschieden werden. Wenn sich Fluidteilchen in nebeneinanderlaufenden, sich nicht vermischenden Schichten bewegen¹⁵, ist die Strömung laminar. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit, wie in diesem Versuch, erfolgt aufgrund von Reibung bzw. Impulsaustausch der Umschlag zur turbulenten Strömung, die mit der kritischen Reynolds-Zahl experimentell erfasst wird. (Vgl. Sigloch 2014, 90-94) Für Umströmungen ist

$$Re_{kr} = 3 \cdot 10^5 \text{ bis } 5 \cdot 10^5$$
 (37)

und variiert je nach Strömungssituation.

4.6.5 Experiment 34: Magnus-Effekt

a) Materialien

- Papier
- Klebeband

b) Vorbereitung und Durchführung

Für dieses Experiment wird aus Papier eine Rolle, wie in Abb. 97 zu sehen ist, gebaut. Zwei A5-Blätter werden dazu leicht konisch zu einer Röhre geklebt und dann ineinander gesteckt verklebt. die Enden werden zuvor bündig geschnitten. Der konische Verlauf wirkt sich positiv auf die Stabilität des Fluges aus. Dann wird die Rolle unter langsamer Rotation fallen gelassen.

_

¹⁵ [Anm.: Siehe Versuche von *Reynolds*, der dies durch Farbstoffspuren in Strömungen veranschaulicht hatte.]



Abb. 97: Papierrolle Magnus-Effekt

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Je nach Drehrichtung, fliegt die Papierrolle in die eine oder andere Richtung, als würde sie angezogen werden. Diesen Effekt nennt man Magnus-Effekt. Die Rotation kann als stationäre Kreisströmung um die Rolle angenähert werden. Tritt nun eine Anströmung auf, überlagern sich beide Strömungen und es entsteht ein unsymmetrisches Strömungsbild. Durch die Addition bzw. Subtraktion der Geschwindigkeiten, treten Dichteunterschiede auf. Die Rolle wird durch eine durch den Unterdruck erzeugte Querkraft, in die Richtung gezogen, in der sich die Anströmungen addieren (oben). Diese Kraft wird auch fluiddynamischer Auftrieb oder Magnus-Effekt genannt. Er tritt auch bei rotierenden kugelförmigen Projektilen auf. (Vgl. Sigloch 2014, 245f.)

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Eine Anwendung stellt der Flettner-Rotor auf Schiffen dar. Vertikal stehende rotierende Zylinder werden als Segel-Ersatz angebracht. Sie sorgen durch den Magnus-Effekt für Vortrieb, haben jedoch einen schlechten Wirkungsgrad. (Vgl. Siegloch 2014, 255f.)

4.6.6 Experiment 35: Der abhebende Papierstreifen, Wirbelstraße

a) Materialien

Papier

b) Vorbereitung und Durchführung

Ein 3 cm breiter und 21 cm langer Papierstreifen wird laut Abb. 98 gehalten und an der Oberseite angeblasen. Zuerst sollte dies nur leicht, dann stärker werdend geschehen.



Abb. 98: Papierstreifen

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Es ist zu beobachten, dass sich der Streifen unter Anströmung von oben hebt (Abb. 99). Dies passiert aufgrund von Unterdruck, der sich bei schnellen Fließgeschwindigkeiten aufbaut und den Streifen nach oben hebt. Unter zunehmend starker Strömung beginnt sein Ende zu flattern, was auf die Entstehung einer Wirbelstraße durch die Grenzschichtablösung am hinteren Ende hinweist. Sogenannte *Kármánsche Wirbelstraßen* (Abb. 100) entstehen ab einer Reynoldszahl von $Re \geq 30$ als gegenläufig rotierende Wirbelblasen, die ab diesem Wert erst beginnen ihre typische Pendelbewegung zu zeigen. Bis etwa Re < 200 ist die Straße laminar, wobei Wirbelstraßen auch bei viel höheren Reynoldszahlen noch auftreten. Durch diese Bewegung wird auch das Ende des Papierstreifens angeregt und er beginnt zu schwingen. (Vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Kármánsche_Wirbelstraße)



Abb. 99: Papierstreifen hebt ab



Abb. 100: Kármánsche Wirbelstraße (Wikipedia "Kármánsche Wirbelstraße" 2020)

4.6.7 Experiment 36: Fallschirm

a) Materialien

- Seidenpapier
- dünner Faden
- Büroklammern als Masse

b) Vorbereitung und Durchführung

Der Fallschirm wird laut Abb. 101 gebaut. Aus Seidenpapier wird dazu eine kreisrunde Fläche mit einem Durchmesser von 20 cm ausgeschnitten, an deren Ecken gleichmäßig verteilt fünf Schnüre mit einer Länge von 30 cm angebracht werden. Die Büroklammer dient als Ballast. Wie groß sollte sein Durchmesser sein, wenn er als hohle Halbkugel vereinfacht eine 90 kg schwere Last mit 8 m/s sinken lassen soll?



Abb. 101: Fallschirm

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Der Schirm verringert die Sinkgeschwindigkeit durch seinen hohen Luftwiderstand. Er kann als Halbkugelschale berechnet werden. Dafür schreiben wir die Widerstandskraft

$$F_W = F_G = m \cdot g \tag{38}$$

und setzen für F_W ein:

$$\zeta_W \cdot \rho \cdot \left(\frac{c_\infty^2}{2}\right) \cdot A_{St} = m \cdot g \tag{39}$$

Daraus berechnet sich die Fläche A_{St} mit den Zahlenwerten für den Widerstandsbeiwert $\zeta_W = 1.43$, der Dichte der Luft $\rho = 1.19 \text{ kg/m}^3$, der Geschwindigkeit $c_\infty = 8 \text{ m/s}$, der Masse m = 90 kg und der Erdbeschleunigung g = 9.81 m/s. Der notwendige Durchmesser des Schirms D = 4.69 m ergibt sich mit Formel 40.

$$D = \sqrt{A_{St} \cdot \frac{4}{\pi}} \tag{40}$$

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Fallschirme haben oft ein Loch in der Mitte, welches ein gleichmäßiges Sinken fördert, da die angestaute Luft gezielt entweichen kann. Entweicht sie über die Seitenränder, kann es zu Pendelbewegungen kommen.

4.6.8 Experiment 37: Der Papier-Schrauber

a) Materialien

- Bleistift
- Papier
- Klebstoff

b) Vorbereitung und Durchführung

Aus einem DIN-A6-Blatt wird eine Röhre gewickelt und die letzte Wicklung festgeklebt (Abb. 102). Die zwei Rotorblätter werden aus Papier geklebt, wobei das Profil aus mehreren Lagen aufgebaut ist, damit es den Kräften standhält. Dazu sind zur Verstärkung an der Unterseite zwei, an der Oberseite eine zusätzliche Lage Papier eingeklebt. Die Form ergibt sich nach dem Zusammenfalten und Kleben durch eindrücken der Unterseite. Zwei Rotorblätter werden mit Superkleber an der Papierröhre befestigt. Zur Verstärkung ist diese mit etwas Zwirn umwickelt. Nach außen hin verjüngt sich das Blatt (Abb. 103).



Abb. 102: Flügelfestmachung



Abb. 103: Blattgeometrie

Die Geometrie ist eher an die eines Windkraftanlagen-Flügels angelehnt, als an die eines Hubschrauber-Rotorblatts. Dies hat mehrere Gründe. Es sind z. B. die Umlaufgeschwindigkeiten bei Hubschrauberrotoren wesentlich höher. Die zwei Rotorblätter im Versuch sind nicht schwenkbar, wodurch der Querschnitt eine andere Form annehmen kann, weil die Nase nur für eine Anströmrichtung ausgelegt sein muss. Rotorblätter bei Hubschraubern und Windkraftanlagen sind schwenkbar, um je nach Schub bzw. Windgeschwindigkeit justieren zu können.

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Durch die schnelle Rotation hebt der Schrauber ab. Er sinkt, sobald seine Drehzahl nicht ausreichend hoch ist, um noch genug Luft nach unten drücken zu können. Die Blätter agieren wie Tragflächen, mit dem Unterschied, dass die Anströmgeschwindigkeit in der Mitte gleich Null ist und über den Durchmesser linear mit $v = \omega \cdot r$ ansteigt. Die Rotationsenergie

$$E_{Rot} = \frac{1}{2} \cdot I_z \cdot \omega^2 \tag{41}$$

mit dem Trägheitsmoment I_z um die z-Achse. Wenn nun die Winkelgeschwindigkeit ω im Quadrat eingeht, ergibt sich ein quadratischer Zusammenhang zwischen Drehzahl und Energie, was bei der Konstruktion der Rotorblätter einfließen muss. Bei Windkraftwerken wird darauf Rücksicht genommen, indem sich der Querschnitt über die Länge der Blätter ändert.

Die Strahltheorie von Bernoulli geht idealisierend davon aus, dass ein kreisförmiges Kontinuum nach unten beschleunigt für Auftrieb sorgt, wie in Abb. 104 zu sehen ist (vgl. Bittner 2014, 47).

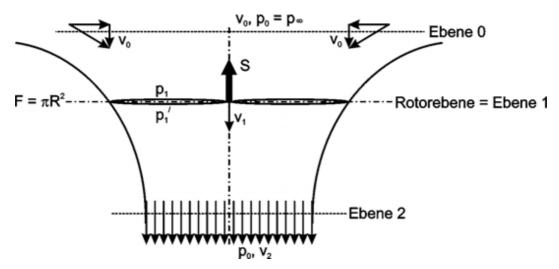


Abb. 104: Stromfaden (Bittner 2014, 47)

In Abb. 105 und Abb. 106 ist zu erkennen, dass in Naben-Nähe eine viel geringere Umlaufgeschwindigkeit vorherrscht, als an den Blattspitzen.



Abb. 105: Rotation 1



Abb. 106: Rotation 2

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Um den Handpropeller zu verbessern, empfiehlt es sich, den Blatt-Schaft-Übergang zu verstärken, da dies seine größte Schwachstelle ist. Außerdem sind die Blätter aus 2-lagigem Papier geklebt, die untere Fläche durch eine dritte Lage verstärkt. Außerdem spielt die Massenverteilung eine wichtige Rolle. Wenn der Schwerpunkt zu hoch liegt, rotiert der Schrauber instabil. Liegt er zu tief, ist er unnötig schwer und hebt nicht ab.

4.6.9 Experiment 38: Fliegende Papierrolle

a) Materialien

- Papier
- Klebeband
- Heftklammern

b) Vorbereitung und Durchführung

Aus einem DIN-A4-Blatt wird ein Ring gefaltet, indem man der Länge nach 2-cm-Streifen umfaltet, bis nur noch 5 cm übrig bleiben. Dann wird er mit dem Wulst nach außen zu einem Reifen geklammert (Abb. 107).



Abb. 107: Papierring

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Der Ring fliegt ohne Drall stabil, da sein Schwerpunkt weit vorne liegt und das nach hinten überstehende Papier als Leitwerk dient. Mit Drall entsteht ein gespeicherter Eigendrehimpuls, der zusätzlich Flug-Stabilität gibt. Umso mehr Energie beim Werfen in die Rotation fließt, desto geringer ist die Translationsenergie. Es gibt also einen "Sweetspot", bei dem genug Drall für einen stabilen Flug vorhanden ist, aber nicht so viel, dass der Ring zu stark sinkt. Bei zu hohem Drall, versucht der Ring seinen Drehimpuls beizubehalten und seine Nase kippt beim Einsetzen der Sinkbewegung nicht nach vorne. Er bleibt stabil in seiner Position, sinkt jedoch bereits und erfährt dadurch einen immer größeren Luftwiderstand, da sich die Anströmungsrichtung kontinuierlich ändert. 16

-

¹⁶ Anm.: Siehe Drallstabilisierung bei Projektilen.

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Eine zu große Länge hat negative Auswirkungen auf die Flugeigenschaften, da zwar ein hohe Stabilität gegeben ist, jedoch verlagert sich auch der Schwerpunkt und die Luftwiderstand nimmt durch Reibung zu.

4.6.10 Experiment 39: Fallendes Papier, chaotische Systeme

a) Materialien

- Papier

b) Vorbereitung und Durchführung

Um das Flugverhalten eines fallenden Blattes zu erforschen, wird ein DIN-A6-Blatt zuerst aus 0.3 m, dann 1 m und zuletzt aus 2 m Höhe fallen gelassen.

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Bei geringer Höhe sinkt das Blatt in einer leichten Torkelbewegung zu Boden (Abb. 108). Von 1 m Höhe beginnt es zu torkeln und landet manchmal auf der anderen Seite (Abb. 109). Aus 2 m Höhe vollführt es bereits teilweise mehrfache Überschläge und unterliegt starken Geschwindigkeitsunterschieden (Abb. 110). Dieses Verhalten weist typische Charakteristika chaotischer Systeme auf. Kleinste Änderungen beim Abwurf führen zu stark unterschiedlichen Ergebnissen. Es ist ab einer bestimmten Höhe nicht mehr absehbar, auf welcher Seite das Blatt landen oder wie dessen Flugbahn aussehen wird.



Abb. 108: Blatt aus 30 cm Höhe



Abb. 109: Blatt aus 100 cm Höhe



Abb. 110: Blatt aus 200 cm Höhe

Chaotische Systeme treten in der Natur häufig auf. Das Diagramm in Abb. 111 zeigt eine Bifurkation (Verzweigung), bei der ein Parameter in einem nichtlinearen System zu plötzlichen Änderungen des Systems führt. Für den Fall des Papiers ist die Fallhöhe der Parameter und im Diagramm würde er auf der horizontalen Achse aufgetragen werden. Ändert sich bei geringen Abwurfhöhen noch nicht viel, fliegt von 100 cm fallend das Blatt jedoch schon sehr unkontrolliert und landet an immer weiter voneinander entfernten Stellen bzw. wendet sich.

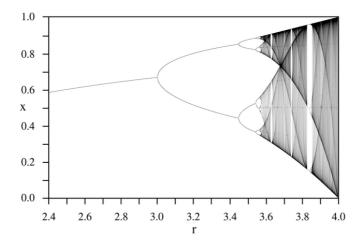


Abb. 111: Chaotische Systeme, Bifurkationsdiagramm (https://de.wikipedia.org/wiki/Bifurkation_(Mathematik) [Stand: 21.06.2020])

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Es können in chaotischen Systemen auch Zonen auftreten, in denen sich das Chaos "einpendelt" und kurzzeitig vorhersehbare Zustände vorhanden sind.¹⁷ Auf dieses Experiment bezogen, können Blätter in einem bestimmten Abwurfhöhenbereich wieder regelmäßig auf der gleichen Seite landen. Sobald man diesen Bereich überschreitet, tritt wieder unvorhersehbares Verhalten ein.

Im Unterschied zum fallenden Butterbrot, ist Papier nicht biegesteif und relativ zu seiner Masse und Fläche hohem Luftwiderstand ausgesetzt. Das Brot würde jedoch bei größeren Fallhöhen auch zu chaotischem Landeverhalten neigen.

.

¹⁷ Anm.: siehe Intermittenz.

4.6.11 Experiment 40: Fliegende Karten, Präzession

a) Materialien

- dünner Karton oder Spielkarten

b) Vorbereitung und Durchführung

Es existiert der Mythos¹⁸, dass Spielkarten als gefährliche Waffe eingesetzt werden können, indem man sie mit großer Wucht und einem Spin wirft. Warum Karten bis zu 60 m weit fliegen können und welche Flugeigenschaften sie aufweisen, soll mit diesem Experiment erklärt werden.

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Durch die schnelle Rotation hat die Karte eine stabile Flugbahn (Abb. 112). Der Spin garantiert einen sehr geringen Luftwiderstand in Bewegungsrichtung. Dadurch können beim Werfen hohe Geschwindigkeiten und Wurfweiten erzielt werden. Durch die hohe Geschwindigkeit v steigt trotz der geringen Masse m auch die kinetische Energie

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2. \tag{42}$$



Abb. 112: Spielkarte in Rotation

98

 $^{^{18}}$ Anm.: Im Buch des Magiers Rick Jay, das den Titel "Cards as Weapons" trägt und vergriffen ist, wird der Mythos aufgegriffen.

Der Eigendrehimpuls stabilisiert die Karte. Wenn beim Abwurf ein äußeres Moment hinzukommt, erfährt sie eine zusätzliche Rotationsbewegung, vergleichbar mit der Präzession eines Kreisels. So drehen sich Karten, die unter einem Winkel von z. B. 70° geworfen werden, gegen den Uhrzeigersinn (Abb. 112), weil ihre Rotationsachse schon beim Abwurf aufgrund ihrer Position ein äußeres Drehmoment erfuhr. Dies kann experimentell mit unterschiedlichen Winkeln nachgewiesen werden. Bei senkrechter Ausrichtung zeigt die Karte keine bestimmte Tendenz auf eine Seite kippen zu wollen.

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Der Weltrekord im Kartenwerfen liegt momentan bei 65.96 m.¹⁹ Es treten dermaßen hohe Energien auf, dass die Spielkarten mühelos Karotten durchschlagen oder in Melonen stecken bleiben.

4.6.12 Experiment 41: Heißluftballon aus Seidenpapier

a) Materialien

- Seidenpapier
- Klebstoff
- Papier
- (Heißluft-) Föhn

b) Vorbereitung und Durchführung

Der Ballon besteht aus fünf Bögen Seidenpapier. Ein Bogen wird quadratisch zugeschnitten. Er bildet die obere Ballonfläche. An ihm werden nun die rechteckigen Blätter stirnseitig festgeklebt. Dann stülpt man die Konstruktion über ein passende Schachtel und schließt die Seiten durch sparsam aufgetragenen Kleber. Am besten eignet sich hierfür UHU-Stick. Am unteren Ende wird der fertige Ballon zusammengeklammert, damit sich seine Öffnung verkleinert, die heiße Luft nicht sofort wieder ausströmen kann und sich an dieser Stelle etwas mehr Masse durch die Klammern befindet. Um ihn steigen zu lassen, empfiehlt es sich, im Winter ins Freie zu gehen oder zumindest auf einen kühleren Tag zu warten. Mit dem Föhn ist der Ballon

_

¹⁹ Siehe Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Card throwing [21.06.2020].

in wenigen Sekunden aufgeblasen, jedoch reicht die Temperatur für einen Flug noch nicht aus und man sollte ihn weiter beheizen.

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Der Ballon steigt, da seine heiße Luft im Inneren eine geringere Dichte aufweist, als die ihn umgebende Luft (Abb. 113). Wenn die Dichte

$$\rho = \frac{p}{R_S \cdot T} \tag{43}$$

mit dem Druck p, der spezifischen Gaskonstante $R_s = 287 \frac{J}{\text{kg·K}}$ und der Temperatur T ist, kann man die Differenz zwischen der verdrängten Masse der kalten Luft

$$m_{verdr} = V \cdot \rho_k \tag{44}$$

und die Masse der heiße Luft

$$m_h = V \cdot \rho_h \tag{45}$$

bei

- $-V = 0.125 \text{ m}^3$
- $p = 100000 \, \text{Pa}$
- $T_k = 273 \text{ K}$
- $T_h = (273 + 80) \text{ K}$

berechnen und erhält als Differenz $m_k - m_{verdr} = 36$ g. Die Masse des leeren Ballons ist 32 g. Er kann steigen.



Abb. 113: Heißluftballon aus Seidenpapier

4.7 Akustik

4.7.1 Experiment 42: Instrumente mit Gummiringen

a) Materialien

- Gummiring
- Karton-Schachtel

b) Vorbereitung und Durchführung

Die Schachtel wird laut Abb. 114 bespannt. Ein Gummiring wird dazu aufgeschnitten und an den Enden mit Knoten in zwei kleine Schlitze in die Schachtel gespannt. Mit diesem Aufbau sollen Schwingung, Frequenz und Schwingungsknoten untersucht werden.



Abb. 114: Saite aus Gummiring

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Durch das Einspannen der Saite ist sie beidseitig begrenzt. Wenn nun eine Anregung stattfindet, die nicht genau mittig ist, läuft die Welle zum anderen Ende und wird dort reflektiert (Abb. 115). Sie läuft wieder zurück und so weiter. Nach einigen Reflexionen überlagern sich diese und es kristallisiert sich eine Grundschwingung heraus (Abb. 116), die eine bestimmte Frequenz ν hat und abhängig von der Länge l, Spannkraft F, Querschnittsfläche A und der Dichte ρ der Saite ist. (Vgl. Lüders 2012, 368)

$$\nu_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{A\rho}} \tag{46}$$

Die Grundschwingung mit der Wellenlänge

$$\lambda_0 = 2l \tag{47}$$

hat keine Knoten. Wenn man künstlich durch Halbierung der Saite einen Knoten erzeugt, wird die erste Oberschwingung als stehende Welle sichtbar (Abb. 117). Ihre Frequenz ist genau doppelt so hoch (eine Oktave höher). Es können beliebig viele weitere Schwingungsknoten erzeugt werden, wobei sich die Frequenz immer um den Betrag der Grundschwingung erhöht. Dies ist nur durch Dämpfung und dem individuellen Schwingungsverhalten der Materialien beschränkt und führt bei Instrumenten zu verschiedenen Klangcharakteristiken. Abb. 118 zeigt zwei Schwingungsknoten, womit die Frequenz auf das Dreifache der Grundfrequenz ansteigt.



Abb. 115: Saite kurz nach dem Anschlagen



Abb. 116: Saite Grundschwingung



Abb. 117: Saite mit einem Schwingungsknoten



Abb. 118: Saite mit zwei Schwingungsknoten

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Der Kammerton a' dient als Referenzton und hat eine Frequenz von $\nu=440$ Hz, eine Oktave höher befindet sich a'' mit einer verdoppelten Frequenz von $\nu=880$ Hz. Instrumente werden gestimmt, um harmonisch miteinander interagieren zu können. Es kann vorkommen, dass eine Band oder das Orchester den Kammerton um einige Hertz verschieben muss, wenn ein Instrument eine besondere Stimmung verlangt. Auch Schlagzeuge können gestimmt werden. In der Bauphysik beträgt die Normfrequenz für akustische Messungen 1000 Hz.

4.7.2 Experiment 43: Flöten und Pfeifen

a) Materialien

- leere Stifte
- Stößel aus Material der Wahl
- Kolben aus nassem Papier
- Stimmgerät, um die Tonhöhe zu messen

b) Vorbereitung und Durchführung

Es werden zwei Pfeifen gebaut und ihre Tonhöhe aufeinander abgestimmt, indem der im Fineliner verschiebbare Bolzen justiert wird (Abb. 119 und Abb. 120). Die Tonerzeugung erfolgt durch flaches Anblasen der oberen Kante. Es wird mit einem Stimmgerät der Ton bestimmt.



Abb. 119: Pfeife einseitig verschlossen



Abb. 120: Pfeife mit verstellbarer Länge der Luftsäule

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Die genaue Frequenz kann man sich aus der schwingenden Luftsäule berechnen. Für gedeckte (einseitig verschlossene) Pfeifen, errechnet sich die Frequenz

$$f = \frac{c}{\lambda} \tag{48}$$

mit der Schallgeschwindigkeit c=340 m/s und der Wellenlänge $\lambda=4\cdot l$. Die Länge l=0.101 m und entspricht in diesem Fall der Länge der Pfeife (siehe Abb. 119). Bei Flöten und Pfeifen tritt eine Schwingung der Luftsäule in Längsrichtung auf. In Abb. 121 sind die Druckamplituden zur besseren grafischen Sichtbarkeit in Querrichtung dargestellt.

Die errechnete Frequenz beträgt f = 841.6 Hz und liegt damit ungefähr zwischen a" (880 Hz) und gis" (830.609 Hz). Das Stimmgerät zeigt ein tiefes gis" an (Abb. 122).

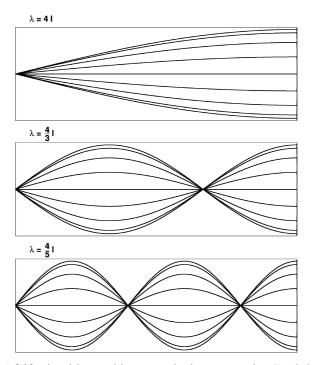


Abb. 121: Pfeife einseitig geschlossen, Schwingungsmoden (Roth 2016, 551)



Abb. 122: Chromatisches Stimmgerät zeigt gis"

Die Pfeife klingt, da die Luft an der Kante gebrochen wird und sich dadurch periodisch Wirbel in Form von Druckschwankungen ablösen.

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Bei Blechblasinstrumenten entstehen diese Druckvariationen mit Hilfe der Lippen am Mundstück und voll klingende Töne, wenn die Schwingungen die gleiche Frequenz wie die der Luftsäulen-Moden annehmen. Zwischentöne können durch das Verändern der Rohrlänge (Ventile, Züge) gespielt werden. (Vgl. Roth 2016, 510f.) Bei Orgelpfeifen passiert dies aufgrund einer Schneide. Die Luft wird geteilt und Wirbel regen die Säule zum Schwingen an. Das Gleiche passiert hier im Experiment. An der Oberkante teilt sich der Luftstrom. Wie dies im Detail geschieht, hat Auswirkungen auf den Klang. So erzeugt eine scharfe Kante einen härteren Ton, eine abgerundete Kante klingt weicher.

4.7.3 Experiment 44: Papier-Stimmbänder

a) Materialien

Papier

b) Vorbereitung und Durchführung

Zwischen Daumen und Handballen werden Papierstreifen gespannt (Abb. 123) und mit einem kräftigem Luftstrom aus nächster Nähe angeblasen.



Abb. 123: Schwingende Papierstreifen

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Ein hoher Ton entsteht, wenn die Streifen gespannt sind und der Luftstrahl genau auf sie gerichtet ist. Dies kann als grobes Modell für das Schwingen der Stimmlippen bei Säugetieren gesehen werden. Beim Menschen bilden Stimmlippen die ungefähr zwei cm lange Stimmritze und liegen im Kehlkopf am oberen Ende der Luftröhre. Sie werden beim Ein- und Ausatmen durchströmt und sind bei Männern etwas länger, wodurch tiefere Töne entstehen. Beim Sprechen und Singen wird durch Muskelkontraktion ein periodisches Öffnen und Schließen erzeugt, wobei die Frequenzen im Bereich von 90 bis über 880 Hz angesiedelt sind. Dabei entstehen sägezahnförmige Schallimpulse im quasikontinuierlichen Frequenzspektrum an den Stimmlippen, die die Luftsäulen in Mund-, Nasen-, und Rachenraum anregen, deren Resonanzfrequenzen über 3500 Hz liegen, wodurch sehr hohe Töne durch Oberschwingungen der Hohlräume entstehen können. (Vgl. Lüders 2015, 391f.)

4.7.4 Experiment 45: Papierknaller

a) Materialien

- DIN-A4-Papier

b) Vorbereitung und Durchführung

Das Blatt wird laut Anleitung²⁰ gefaltet. Zum Auslösen des Knallers ist es notwendig, ihn am Ende mit den beiden Spitzen zu halten (Abb. 124) und mit der offenen Seite nach vorne schnell nach unten zu schwingen.



Abb. 124: Papierknaller

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Mit einem lauten Knall kippt eine der beiden Papierlaschen nach vorne. Der Knaller klappt auf, weil Zentrifugalkraft und Strömungswiderstand Kräfte auf die Lasche auswirken. Sobald sich diese zu lösen beginnt, gewinnt die Luftströmung kontinuierlich an Angriffsfläche und löst beim Einrasten in der Endposition den Knall aus (Abb. 125).



Abb. 125: Papierknaller ausgelöst

Das akustische Phänomen des Knalls besteht aus Stoßwellen, die durch anwachsende Amplituden oder Verdichtungsstöße entstehen. Die Schallgeschwindigkeit steigt in der Luft im Bereich großer Amplituden an, sodass bei Explosionen Geschwindigkeiten von 1000 m/s möglich sind. Dies geschieht, da sich die harmonische Schwingung verändert, indem die Schalldruckamplitude Werte um den statischen Druck annimmt und in der Verdichtungsphase steigt, in der Unterdruckphase nur bis zum Wert null (Vakuum) sinken kann. Die negative Halbwelle hat eine (viel) kleinere Amplitude als die positive. Hinzu kommt der Einfluss der Temperatur T (siehe Formel 49) auf die Geschwindigkeit in Gasen

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot RT}{M_n}},\tag{49}$$

wobei $\kappa = c_p/c_v$ (Verhältnis der Wärmekapazitäten bei konst. Druck bzw. konst. Volumen), M_n die molare Masse und R die Gaskonstante ist. Somit bewirkt der Temperaturanstieg in der Verdichtungsphase eine zusätzliche Erhöhung der Schallgeschwindigkeit, der Temperaturabfall in der Dekompressionsphase eine Verminderung von c. Die Steilheit der Front nimmt infolgedessen zu.

Als Stoßwellen werden Wellen mit unstetigen Amplitudenverläufen bezeichnet. Auch Verdichtungsstöße, wie etwa durch fortschreitende Druckstörungen deren Front sich zu einer Stoßfront formt, kommen häufig vor. Körper, die sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegen, lösen auf diese Art einen Knall aus. (Vgl. Lüders 2015, 383f.) Durch das rasche Aufstül-

pen der Papierlasche im Experiment wird die Luft stark komprimiert und es kommt zu einer Stoßwelle, die sich als Knall bemerkbar macht.

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Es kann auch DIN-A3-Papier verwendet werden. Der Knall wird dadurch tiefer. Aber Vorsicht! - Der Knaller sollte nicht aus nächster Nähe zum Ohr ausgelöst werden, da dies zu Verletzungen führen kann.

4.7.5 Experiment 46: Schallkanone

a) Materialien

- Papier
- große Rolle Klebeband
- Kerze

b) Vorbereitung und Durchführung

Es werden zwei Kreise mit dem Außendurchmesser der Klebebandrolle ausgeschnitten. Mit ihnen wird diese daraufhin verschlossen. In einen Kreis wird in die Mitte ein 1 cm großes Loch geschnitten. Die Kerze kann nun entzündet werden und die Rolle mit der Öffnung voran auf die Flamme gerichtet werden (Abb. 126).

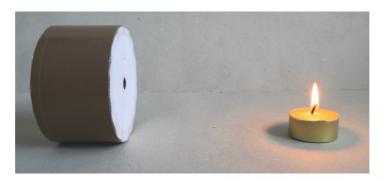


Abb. 126: Schallkanone

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Durch einen leichten Schlag auf die Hinterwand erlischt die Flamme (Abb. 127). Die Luft im Inneren der Röhre wird komprimiert und tritt durch die kleine Öffnung mit höherer Geschwindigkeit aus (Bernoulli). Wie sich das aus der Kanone austretende Gas verhält, zeigt das nächste Experiment.



Abb. 127: Schallkanone bläst Kerze aus

4.7.6 Experiment 47: Vortex-Kanone

a) Materialien

- Schallkanone
- Kerze oder andere Rauchquelle

b) Vorbereitung und Durchführung

Die Kerze wird entzündet, und nach einigen Sekunden wieder ausgeblasen. Der Rauch lässt sich durch die Klebebandrolle auffangen, indem man sie über den erloschenen Docht stülpt. Bei ausreichender Sättigung, wir die Kanone vorsichtig gedreht und auf die hintere Wand geschlagen.

c) Ergebnis & physikalische Erklärung

Es entstehen kleine Rauch-Ringe, die mit zunehmender Flugweite etwas größer werden und durch leichte Luftverwirbelungen ihre Form verlieren (Abb. 128). Sie folgen einer scheinbar stabilen, geradlinigen Bahn.

Beim Austritt der Luft wird sofort neue Luft angesaugt, wodurch beim austretenden Luft-Volumen in der Mitte ein Loch und damit auch die typische Form entsteht. Die Geschwindigkeit der Luft ist in den Außenbereichen der Ringe am größten. (Vgl. Roth 2016, 387f.)



Abb. 128: Vortex-Kanone in Aktion

d) Zusätzliche Informationen/Bemerkungen/Hinweise

Falls das Auffangen des Kerzenrauchs nicht funktioniert, kann ein kleines Stück Papier gerollt und zum Glimmen gebracht werden. Die enge Wicklung verhindert, dass genügend Sauerstoff zur Verbrennung existiert und das Papier glimmt unter starker Rauchentwicklung.

Aber Vorsicht! - Rauch gefährdet die Gesundheit. Das Einatmen feinster Partikel ist schädlich und sollte vermieden werden! Außerdem empfiehlt es sich, vor dem Versuch Ausschau nach Brandmeldern zu halten.

5 Resümee

Die experimentelle Auseinandersetzung mit Dingen aus der Schreibwarenabteilung hat gezeigt, dass oft mit einfachsten Mitteln physikalische Phänomene ergründet werden können. Somit ist es nicht zwingend notwendig, Zugriff auf teure Gerätschaften zu haben, um sich mit den Gesetzmäßigkeiten, die unsere Welt beschreiben, beschäftigen zu können.

Auch lässt sich durch den Zugriff auf kostengünstige Materialien wie Papier oder Bleistift und deren sparsamen Einsatz eine ressourceneffiziente Aufbereitung des Stoffs mit maximaler Involviertheit der SchülerInnen im Unterricht verwirklichen. Vor allem ist das Wiederholen und Weiterdenken der Experimente zu Hause möglich, was durchaus als Motivationsfaktor gewertet werden kann. Komplexe Baukastensysteme, die in manch einer Schule nicht existent oder unvollständig sind, sind meist teuer und eröffnen eher wenig Spielraum für eigenes Forschen. Dementgegen eignen sich Materialien wie Papier für komplexe Erklärungsmodelle und laden auch ein, Neues entdecken zu wollen, da sie in ständigem Gebrauch sind.

Im Laufe der Arbeit zeigte sich, dass Themen oft miteinander verbunden und einige Aufbauten für mehrere Experimente genutzt werden können. Ein ins Papier gestochenes Loch, so banal dies auf den ersten Blick auch klingen mag, könnte für mehrere Unterrichtseinheiten thematisiert werden, wenn ein Themenblock mit optischen Phänomenen umgesetzt werden soll.

Die hier teilweise neu entstandenen und meines Erachtens teils nicht unspektakulären Versuche, können Lehrpersonen als Handreichungen dienen und zum Weiterentwickeln anregen.

6 Literaturverzeichnis

Bittner, Walter: Flugmechanik der Hubschrauber. Technologie, das flugdynamische System Hubschrauber, Flugstabilitäten, Steuerbarkeit. Berlin: Springer 2014.

Blechschmidt, Jürgen (Hrsg.): Taschenbuch der Papiertechnik. 2. Auflage. München: Hanser 2013.

Böge, Alfred; Böge, Wolfgang: Technische Mecahnik. Statik - Reibung - Dynamik - Festigkeitslehre - Fluidmechanik. Wiebaden: Springer-Vieweg 2017.

Demtröder, Wolfgang: Experimentalphysik 2. Elektrizität und Optik. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2009.

Duit, Reinders; Häußler, Peter; Kircher, Ernst: Unterricht Physik: Materialien zur Unterrichtsvorbereitung. Köln: Aulis-Verlag Deubner 1981.

Eichler, Hans-Joachim: Optik. Interferenz, Beugung und Wellenleitung. 10. Auflage. Berlin: De Gruyter 2004. (= Bergmann/Schaefer. Wellen- und Teilchenoptik. Hrsg. von Heinz Niedrig. Bd. 3.)

Eyerer, Peter; Hirth, Thomas: Polymer Engineering. Technologien und Praxis. Hrsg. von Peter Elsner. Berlin: Springer 2008.

Gobrecht, Heinricht: Elektrizität und Magnetismus. Berlin: Walter de Gruyter: 1971. (= Bergmann Schaefer. Lehrbuch der Experimentalphysik. Bd .2.)

Gockel, Tilo: Kompendium digitale Fotografie. Von der Theorie zur erfolgreichen Fotopraxis. Berlin: Springer 2012.

Habenicht, Gerd: Kleben - erfolgreich und fehlerfrei. Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie. 7. Auflage. Wiesbaden: Springer 2016.

Herzberg, Wilhelm: Papierprüfung. Eine Anleitung zum Untersuchen von Papier. Berlin: Springer 1921.

Holleman, A. F.; Wiberg, Egon; Wiberg, Nils: Anorganische Chemie. Band 1: Grundlagen und Hauptgruppenelemente. Berlin: Walter de Gruyter 2017.

Jäger, Helmut: Experimentalphysik 2. Skriptum zur Vorlesung. 36. Auflage. Graz: Institut für Experimentalphysik: Technische Universität Graz 2014.

Jixing, Pan: Die Erfindung und Entwicklung der Papierherstellung. In: Wissenschaft und Technik im alten China. Hrsg. vom Institut für Geschichte der Naturwissenschaften der Chinesischen Akademie der Wissenschaften. Basel: Springer 1989.

Kirchner, Ernst: Physikdidaktik. Theorie und Praxis. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer 2015.

Korn, Rudolf (Hrsg.); Burgstaller, Friedrich (Hrsg.): Handbuch der Werkstoffprüfung. Bd. 4: Papier- und Zellstoff-Prüfung. Berlin: Springer 1944.

Lohrmann, Katrin: Wie gehen Kinder mit Langeweile im Unterricht um? In: Europäisierung der Bildung. Konsequenzen und Herausforderungen für die Grundschulpädagogik. Hrsg. von Michaela Hopf. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften 2009, S. 296-300.

Lüders, Klaus (Hrsg); von Oppen, Gebhard (Hrsg.): Relativistische Physik - von der Elektrizität zur Optik. Berlin: Gruyter 2015. (= Bergmann/Schaefer kompakt. Lehrbuch der Experimentalphysik. Bd. 2.)

Portis, Alan M.; Young, Hugh D.: Physik und Experiment. 2. Auflage. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg & Sohn 1980. (= Berkeley Physik Kurs. Atome, Moleküle, Festkörper. Hrsg. von Roman U. Sexl; Hans-Jörg Jodl. Band 1)

Pottlacher, Gernot; Hixson, R.S.; Melnitzky, S.; Kaschnitz, Erhard; Winkler, M.A.; Jäger, Helmut: Thermophysical Properties of POCO AXF-5Q Graphite up to Melting. In: Thermochimica acta Vol. 218 (1993), S. 183-193).

Roth, Stefan; Stahl, Achim: Mechanik und Wärmelehre. Experimentalphysik - anschaulich erklärt. Berlin: Springer Spektrum: 2016.

Roth, Stefan; Stahl, Achim: Optik. Experimentalphysik - anschaulich erklärt. Berlin: Springer 2019.

Raith, Wilhelm: Lehrbuch der Eperimentalphysik. 9. Auflage. Berlin, New York: Walter de Gruyter 2006. (= Bergmann/Schaefer. Elektromagnetismus. Bd. 2.)

Sigloch, Herbert: Technische Fluidmechanik. Berlin: Springer 2014.

Töpfer, Erich; Jörn, Bruhn: Methodik des Physikunterrichts. 6. Auflage. Heidelberg: Quelle & Meyer 1979.

Wiesner, Hartmut: Physikdidaktik kompakt. Hrsg. von Horst, Schecker; Martin, Hopf. Freising: Aulis 2011.

Wilke, H.-J.: Zur Rolle des Experiments im Physikunterricht. Physik in der Schule. In: Praxis der Naturwissenschaften 18 (1994), NiU-Physik 4, S. 287-295.

Wurz, Otto: Papierherstellung nach neuzeitlichen Erkenntnissen. Wien: Moser 1947.

Internetquellen

Seite "Gummiband". In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Zuletzt geändert am: 3. Juni 2020. URL: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Gummiband&oldid=200601622 [21.06.2020].

Seite "Gummielastizität". In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Zuletzt geändert am: 8. Februar 2019. URL:

https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Gummielastizit%C3%A4t&oldid=185510160 [21.06.2020].

Seite "Kármánsche Wirbelstraße". In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Zuletzt geändert am: 6. Mai 2020. URL:

https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=K%C3%A1rm%C3%A1nsche_Wirbelstra%C3%9Fe&oldid=199690529 [21.06.2020].

Seite "Oberflächenspannung". In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Zuletzt geändert am: 11. Mai 2020. URL:

https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Oberfl%C3%A4chenspannung&oldid=199843351 [21.06.2020].

Seite "Stenopäische Lücke". In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Zuletzt geändert am: 27. Oktober 2019.

URL: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Stenop%C3%A4ische_L%C3%BCcke&oldid=193513909 [21.06.2020].

Seite "Strömungsabriss". In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Zuletzt geändert am: 22. Mai 2020. URL:

https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Str%C3%B6mungsabriss&oldid=200215587 [21.6.2020].

Seite "Leuchtdiode". In: Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Zuletzt geändert am: 21. Mai 2020. URL: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Leuchtdiode&oldid=200174109 [21.06.2020].

Rechtsinformationssystem des Bundes: Rechtsvorschrift für Lehrpläne - allgemeinbildende höhere Schulen. Zuletzt geändert am: 21.06.2020. URL:

 $https://www.ris.bka.gv. at/Geltende Fassung.wxe? Abfrage = Bundesnormen \& Gesetzes nummer = 10008568 \ [21.06.2020].$

7 Anhang

| Abbildungsverzeichnis | |
|--|-------|
| Abb. 1: Wozu dienen Experimente (Wilke 1981, S. 4 (84)) | 3 |
| Abb. 2: Physikalische Experimente (Töpfer 1979, 129) | 4 |
| Abb. 3: Links: Schneiden und Einweichen von Bambus in einem Teich. Rechts: Schöpfer | ı von |
| Bambusbrei zum Formen eines Papierbogens - Illustration aus dem Tian Gong Kal | i Wu |
| (Werke der Natur und der Arbeit) von Song Yingxing, 1637. (Jixing 1989, 171f.) | 6 |
| Abb. 4: Vergleich zwischen Elastomeren (5) und spröden Kunststoffen (1) im Spann | ıngs- |
| Dehnungs-Diagramm (Eyerer 2008, 76) | 11 |
| Abb. 5: Doppelspaltkonstruktion | 13 |
| Abb. 6: Einzelspalt | 14 |
| Abb. 7: Interferenzmuster am Einzelspalt (Eichler 2004, 363) | 15 |
| Abb. 8: Einzelspalt vs. Doppelspalt (https://www.schule-bw.de/faecher-und- | |
| schularten/mathematisch-naturwissenschaftliche- | |
| faecher/physik/unterrichtsmaterialien/wellen/interferenz/ausfall_ordnungen.htm) | 15 |
| Abb. 9: Doppelspaltkonstruktion (Lüders 2015, 285) | 16 |
| Abb. 10: Interferenzmuster durch Beugung am Doppelspalt im Freihandversuch | 16 |
| Abb. 11: Aufbau Lochkamera | 17 |
| Abb. 12: Maße Lochblende (https://physikunterricht-online.de/jahrgang-7/die-lochkamera | a) 18 |
| Abb. 13: Flamme brennt nach unten | 19 |
| Abb. 14: Lochblenden | 20 |
| Abb. 15: Blick durch die Lochblenden (links 0,5 mm) | 20 |
| Abb. 16: Blick durch die Kartonblende mit 0,5 mm Blendenöffnung | 22 |
| Abb. 17: Blendengeometrien | |
| Abb. 18: Abbildungen, Abstand 0.3 m | 23 |
| Abb. 19: Abbildungen am weißen Schirm, Abstand 1-2 m | |
| Abb. 20: Bleistift im Glas #2 | 25 |
| Abb. 21: Bleistift im Glas #1 | |
| Abb. 22: Bleistift im Glas #3 | 25 |
| Abb. 23: Lichtbrechung (Lüders 2015, 240) | 26 |
| Abb. 24: Graphit als Leiter | |
| Abb. 25: Graphit als Leiter, Diode leuchtet | |
| Abb. 26: Schiebewiderstand (a) und Drehwiderstand (b) (Lüders 2015, 89) | 29 |

| Abb. 27: Elektrostatik mit Lineal und Papier | 30 |
|--|----|
| Abb. 28: Papier 100-fach vergrößert | |
| $(https://de.wikipedia.org/wiki/Papier\#/media/Datei:Paper_sheet_100x_SEM_MUSE.tifully and the control of the$ | • |
| [Stand: 30.05.2020]) | 30 |
| Abb. 29: Papierbrücke hängend | 33 |
| Abb. 30: Papierbrücke mit Kanten #1 | 33 |
| Abb. 31: Papierbrücke mit Kanten #2 | 33 |
| Abb. 32: Papierbrücke gefaltet #1 | 33 |
| Abb. 33: Papierbrücke gefaltet #2 | 33 |
| Abb. 34: Gelenksviereck (Böge 2017, 71) | 36 |
| Abb. 35: Papierwürfel #1 | 37 |
| Abb. 36: Papierwürfel #2 | 37 |
| Abb. 37: Papierwürfel zerstört | 38 |
| Abb. 38: Papierwürfel mit Verstärkung | 38 |
| Abb. 39: Münze als Testmasse | 39 |
| Abb. 40: Balance zwischen Münze und Klammermaschine | 40 |
| Abb. 41: Trägheit Bücher | 41 |
| Abb. 42: Büroklammerkreisel | 43 |
| Abb. 43: Büroklammerkreisel | 43 |
| Abb. 44: Gyroskop mit Hebelarm (Roth 2016, 268) | 44 |
| Abb. 45: Kopierpapier sechsmal gefaltet | 45 |
| Abb. 46: Zeitungspapier siebenmal gefaltet | 45 |
| Abb. 47: Seidenpapier achtmal gefaltet | 46 |
| Abb. 48: Zugversuch | 47 |
| Abb. 49: Zugversuch Papier #1 | 48 |
| Abb. 50: Zugversuch Papier #2 | 49 |
| Abb. 51: Drehimpuls lange Schnur | 50 |
| Abb. 52: Drehimpuls kurze Schnur | 50 |
| Abb. 53: Bernoulli-Kuli | 51 |
| Abb. 54: Bernoulli-Ventouri-Kuli (Kerze kann nur im rechten Bild ausgeblasen werden) | 52 |
| Abb. 55: Bleistift auf schiefer Ebene | 55 |
| Abb. 56: Wassersäule und Springbrunnen | 56 |
| Abb. 57: Nasses Papier an der Scheibe | 57 |
| Abb. 58: Nasses Papier mit Löchern an der Scheibe | 57 |

| Abb. 59: Papier beginnt sich zu lösen | 58 |
|--|--------------|
| Abb. 60: Seidenpapier Wärme | 59 |
| Abb. 61: Papierstreifen Seite 1 | 60 |
| Abb. 62: Papierstreifen Seite 2 | 61 |
| Abb. 63: Messung Friction-Stift-Farbe | 62 |
| Abb. 64: Kanone vor dem Zusammenbau | 63 |
| Abb. 65: Kanone vor dem Schuss | 63 |
| Abb. 66: Kanone nach dem Schuss | 64 |
| Abb. 67: Adiabaten (durchgezogene Linien) und Isothermen eines idealen Gases (Lüder | rs |
| 2012, 453) | 65 |
| Abb. 68: Büroklammer schwimmt im Wasser | 66 |
| Abb. 69: Oberflächenspannung (Wikipedia "Oberflächenspannung" 2020) | 67 |
| Abb. 70: Randwinkel bei Flüssigkeiten an festen Wänden (Sigloch 2014, 12) | 67 |
| Abb. 71: Zuschnitt Papierspirale | 68 |
| Abb. 72: Papierspirale hängend | 69 |
| Abb. 73: Bauanleitung Schachtel | 70 |
| Abb. 74: Papierschachtel ohne Massen | 71 |
| Abb. 75: Papierschachtel mit 2 x 1 Euro | 72 |
| Abb. 76: Papierschachtel mit 4 x 1 Euro | 72 |
| Abb. 77: Schachtel kippen | 73 |
| Abb. 78: Schachtel kippt | 73 |
| Abb. 79: Schwimmende Schachtel, Kräfte | 74 |
| Abb. 80: Papierflieger Ruder | 75 |
| Abb. 81: Höhenruder zeigt nach oben | 76 |
| Abb. 82: Höhenruder zeigt nach unten | 76 |
| Abb. 83: Seitenruder zeigt nach rechts | 76 |
| Abb. 84: Höhenruder vorne (https://fscaschaffenburg.de/popupseiten/flugzeugsteuerung | 5-4 / |
| [Stand: 30.05.2020]) | 77 |
| Abb. 85: Schwerpunkt ohne Masse | 78 |
| Abb. 86: Schwerpunkt an hinterer Tragflächenkante | 78 |
| Abb. 87: Tragflächenprofil | 79 |
| Abb. 88: Anfahrwirbel (Sigloch 2014, 337) | 80 |
| Abb. 89: Trennfläche (Sigloch 2014, 337) | 80 |
| Abb. 90: Stromlinienverläufe (Sigloch 2014, 337) | 80 |

| Abb. 91: Druckverteilung Tragfläche (Sigloch 2014, 338) | 81 |
|--|-----|
| Abb. 92: Strömung an der Tragfläche | 82 |
| Abb. 93: Strömungsabriss (Wikipedia "Strömungsabriss" 2020) | 82 |
| Abb. 94: Luftwiderstand | 83 |
| Abb. 95: Papierkugel Luftwiderstand | 84 |
| Abb. 96: Papierkegel Luftwiderstand | 84 |
| Abb. 97: Papierrolle Magnus-Effekt | 86 |
| Abb. 98: Papierstreifen | 87 |
| Abb. 99: Papierstreifen hebt ab | 88 |
| Abb. 100: Kármánsche Wirbelstraße (Wikipedia "Kármánsche_Wirbelstraße" 2020) | 88 |
| Abb. 101: Fallschirm | 89 |
| Abb. 102: Flügelfestmachung | 90 |
| Abb. 103: Blattgeometrie | 91 |
| Abb. 104: Stromfaden (Bittner 2014, 47) | 92 |
| Abb. 105: Rotation 1 | 92 |
| Abb. 106: Rotation 2 | 93 |
| Abb. 107: Papierring | 94 |
| Abb. 108: Blatt aus 30 cm Höhe | 96 |
| Abb. 109: Blatt aus 100 cm Höhe | 96 |
| Abb. 110: Blatt aus 200 cm Höhe | 96 |
| Abb. 111: Chaotische Systeme, Bifurkationsdiagramm | |
| (https://de.wikipedia.org/wiki/Bifurkation_(Mathematik) [Stand: 21.06.2020]) | 97 |
| Abb. 112: Spielkarte in Rotation | 98 |
| Abb. 113: Heißluftballon aus Seidenpapier | 101 |
| Abb. 114: Saite aus Gummiring | 101 |
| Abb. 115: Saite kurz nach dem Anschlagen | 102 |
| Abb. 116: Saite Grundschwingung | 103 |
| Abb. 117: Saite mit einem Schwingungsknoten | 103 |
| Abb. 118: Saite mit zwei Schwingungsknoten | 103 |
| Abb. 119: Pfeife einseitig verschlossen | 104 |
| Abb. 120: Pfeife mit verstellbarer Länge der Luftsäule | 104 |
| Abb. 121: Pfeife einseitig geschlossen, Schwingungsmoden (Roth 2016, 551) | 105 |
| Abb. 122: Chromatisches Stimmgerät zeigt gis" | 106 |
| Abb. 123: Schwingende Papierstreifen | 107 |

| Abb. 124: Papierknaller | 108 |
|--|-----|
| Abb. 125: Papierknaller ausgelöst | 109 |
| Abb. 126: Schallkanone | 110 |
| Abb. 127: Schallkanone bläst Kerze aus | 111 |
| Abb. 128: Vortex-Kanone in Aktion | 112 |