

90 Experimente zur Physik mit Kerzen

**Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades
eines Magisters der Naturwissenschaften**

an der
Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Christoph MENNER
Johannes NISTELBERGER

Begutachter:

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

Graz, Mai 2016

Kurzfassung:

Inspiziert von der Weihnachtsvorlesung 2012, an der TU Graz, gehalten von Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Pottlacher Gernot, wurde die vorliegende Arbeit „90 Experimente zur Physik mit Kerzen“ verfasst. Die Arbeit gliedert sich dabei in einen theoretischen und einen experimentellen Teil, wobei der zweite Teil, mit einem Umfang von 90 physikalischen Experimenten, überwiegt. Aufgrund des umfangreichen Themas, wurde diese Diplomarbeit für zwei Autoren ausgeschrieben. Zu Beginn der Arbeit werden den Leserinnen und Lesern geschichtliches Hintergrundwissen, sowie die Herstellungsarten, bis hin zu den physikalischen Aspekten der Kerzenflamme nahegebracht. Im experimentellen Teil, welcher vorwiegend auf den Inhalten der Weihnachtsvorlesung basiert, werden die Vorbereitungen, die Versuchsdurchführungen und physikalischen Erklärungen beschrieben. Zusätzlich wurde der überwiegende Teil mit Bemerkungen versehen, welche Querverbindungen zur Physik des Alltags darstellen sollen. Ziel der Arbeit ist es, den Leserinnen und Lesern ein möglichst breites Spektrum an physikalischen Phänomenen, anhand diverser Experimente, zu vermitteln.

Abstract

Inspired by the Christmas lecture in 2012 at TU Graz held by Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher, the idea was born to create this thesis called “90 Experimente zur Physik mit Kerzen”. The thesis is structured into a theoretical and a practical part with the latter being predominant with its 90 physical experiments. Because of the extensive topic, this diploma thesis was put up for two authors. At the beginning of the thesis the reader will be informed about the historical background and the different production types as well as the physical aspects of the candle flame. In the experimental part, which is mainly based on the content of the Christmas lecture, the preparations, test executions and physical explanations will be described. Additionally, comments representing cross connections to everyday physics are largely provided in that part. On the basis of various experiments, the main aim of the thesis is to show the reader as wide a range of physical phenomena as possible.

Eidesstattliche Erklärung

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

Datum:

Unterschrift

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

Datum:

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei all denjenigen bedanken, die uns während der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

Als allererstes gebührt unser Dank Herrn Ao. Univ. – Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. POTTLACHER Gernot, der unsere Diplomarbeit betreut und begutachtet hat. Für die hilfreichen Anregungen und die nachmittäglichen Laboraufenthalte bei der Erstellung dieser Arbeit möchten wir uns herzlich bedanken.

NISTELBERGER:

Ein besonderer Dank gebührt meinen Freunden und meiner Familie, die mich während meiner Laufbahn unterstützten und mir zur Seite standen.

Ein riesiges Dankeschön auch an meine Eltern Gerlinde und Johann, die mich von klein auf bei allen Belangen unterstützten, ob finanziell, moralisch oder emotional und mich auf meinen Weg hierher immer begleitet haben.

MENNER:

Würde ich mich bei allen Menschen, welche mich während meiner Studienzzeit unterstützt haben, bedanken, würde dies den Rahmen der Diplomarbeit sprengen. Meinen Eltern, Rudolf und Andrea, gilt jedoch der größte Dank, da ich ohne der finanziellen und moralischen Unterstützung, meine Studienzzeit nicht in der Form hätte genießen können, wie ich es tat.

Die Studentenstadt Graz, mit all ihren Facetten, hat mir eine prägende Zeit beschert. Egal ob das klassische Prüfungsbier, die nächtlichen Streifzüge durch das Univiertel, oder aber die aufmunternden Worte, wenn es nicht nach Plan lief.

Ich danke allen die mich auf dem Weg zum Abschluss unterstützt haben, in welcher Form auch immer.

In Bezug auf die Diplomarbeit möchte ich dir, Johannes, für tolle Zusammenarbeit danken, denn auch wenn es zwischendurch recht stressig wurde, haben wir uns immer gegenseitig motiviert und zum guten Schluss und Ende die Arbeit fertiggestellt.

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	I
Eidesstattliche Erklärung.....	II
Danksagung.....	III
1. Einleitung (MENNER, NISTELBERGER).....	1
2. Definition Kerze (MENNER).....	3
3. Etymologie der Begriffe – Kerze, Wachs, Docht (MENNER)	4
4. Geschichtlicher Hintergrund (MENNER).....	5
4.1. Experiment 1: Kerzen schneuzen	8
4.2. Die Kerze und das Christentum	9
5. Herstellungsarten (MENNER).....	10
5.1. Kneten.....	10
5.1.1. <i>Experiment 2: Rollen einer Bienenwachskerze</i>	11
5.2. Pressen	13
5.3. Strangpressen	13
5.4. Pulverpressen	13
5.5. Tauchen	14
5.5.1. <i>Experiment 3: Kerzen tauchen</i>	15
5.6. Ziehen	17
5.7. Gießen.....	17
5.7.1. <i>Experiment 4: Gießen einer Kerze</i>	18
5.8. Angießen.....	20
5.9. Die Weiterverarbeitung von Kerzen	20
6. Bestandteile einer Kerze (NISTELBERGER).....	21
6.1. Paraffin.....	22
6.1.1. <i>Experiment 5: Dichteverhalten von Paraffin und Wasser (MENNER)</i>	23
6.2. Stearin.....	25
6.3. Gehärtete Fette.....	25
6.4. Bienenwachs	26
6.5. Docht.....	27
6.5.1. <i>Experiment 6: Tafelkreide als Docht</i>	28

7.	Verbrennungsvorgang (MENNER)	29
7.1.	<i>Experiment 7: Nachweis von Wasser und Kohlenstoff</i>	31
7.2.	<i>Experiment 8: Vier Aggregatzustände der Kerze:</i>	33
7.3.	<i>Experiment 9: Fettbrand mit Paraffin (NISTELBERGER)</i>	35
8.	Flammenzonen (NISTELBERGER)	37
8.1.	<i>Experiment 10: Dampf mit Rohr in Gefäß einleiten. Brennprodukt aus der Mitte der Kerzenflamme (MENNER)</i>	39
8.2.	<i>Experiment 11: Ruß leuchtet (MENNER)</i>	41
9.	Die Form der Kerzenflamme (NISTELBERGER)	43
9.1.	<i>Experiment 12: Konvektion über Kerzenflamme mit Wärmebildkamera zeigen</i>	44
9.2.	<i>Experiment 13: Die Weltraumkerze</i>	46
10.	Das Licht einer Kerze (NISTELBERGER)	48
10.1.	<i>Experiment 14: CD-Spektroskopie</i>	50
11.	Experimente zur Kerze (MENNER)	50
11.1.	<i>Experiment 15: Das Prinzip der Davy'schen Sicherheitslampe</i>	51
11.2.	<i>Experiment 16: Schwimmlage einer Kerze</i>	53
11.3.	<i>Experiment 17: Kerze unter Wasser</i>	55
11.4.	<i>Experiment 18: Diffusion roter Farbe</i>	57
11.5.	<i>Experiment 19: Wasserkochen in Papiergefäß (NISTELBERGER)</i>	59
11.6.	<i>Experiment 20: Ballon und Kerze</i>	60
12.	Experimente zur Kerzenflamme (NISTELBERGER)	62
12.1.	<i>Experiment 21: Nachweis der heißesten Flammenzone (MENNER)</i>	62
12.2.	<i>Experiment 22: Schlieren über Kerzenflamme projizieren</i>	64
12.3.	<i>Experiment 23: Brennen tiefgefrorene Kerzen?</i>	66
12.4.	<i>Experiment 24: Konvektionsmotor</i>	68
12.5.	<i>Experiment 25: Teebeutel steigen lassen</i>	70
13.	Experimente zur Lichttechnik (NISTELBERGER)	71
13.1.	<i>Experiment 26: Hefnerkerze</i>	72
13.2.	<i>Experiment 27: Das Farbhufeisen</i>	74
13.3.	<i>Experiment 28: Spektrum einer Kerzenflamme</i>	76
13.4.	<i>Experiment 29: Kerzenkorona</i>	78
13.5.	<i>Experiment 30: Ampelflamme</i>	79
14.	Experimente zum Anzünden von Kerzen (MENNER)	81
14.1.	<i>Experiment 31: Anzünden einer Kerze mittels Zündholz</i>	81

14.2.	<i>Experiment 32: Kerze über Dampfschlauch anzünden.....</i>	83
14.3.	<i>Experiment 33: Anzünden einer Kerze mit einem Hohlspiegel.....</i>	85
14.4.	<i>Experiment 34: Anzünden einer Kerze mit einer Linse.....</i>	88
14.5.	<i>Experiment 35: Anzünden von Kerzen mit einem Laser.....</i>	90
14.6.	<i>Experiment 36: Anzünden einer Kerze in der Mikrowelle.....</i>	92
14.7.	<i>Experiment 37: Plasmaball in Mikrowelle.....</i>	94
14.8.	<i>Experiment 38: Anzünden einer Kerze mit Hochspannungstransformator.....</i>	96
15.	Experimente zur Optik (NISTELBERGER).....	98
15.1.	<i>Experiment 39: Physiker Adventkranz.....</i>	99
15.2.	<i>Experiment 40: Die Unendlichkeit.....</i>	101
15.3.	<i>Experiment 41: Schusterkugel.....</i>	103
15.4.	<i>Experiment 42: Brechung der Kerze im Wasser.....</i>	105
15.5.	<i>Experiment 43: Schatten von Flammen.....</i>	107
15.6.	<i>Experiment 44: Kerze hinter Glas/Siliziumscheibe.....</i>	109
15.7.	<i>Experiment 45: Feuerwerksbrille.....</i>	111
16.	Experimente zur Bewegung von Kerzenflammen (NISTELBERGER).....	112
16.1.	<i>Experiment 46: Kerze mit einem Trichter anblasen.....</i>	112
16.2.	<i>Experiment 47: Luftzug bei offenen Türen.....</i>	114
16.3.	<i>Experiment 48: Der Bernoulli-Effekt mit 2 Kerzen.....</i>	116
16.4.	<i>Experiment 49: Tanzende Kerze vor einem Lautsprecher.....</i>	118
16.5.	<i>Experiment 50: Elektrischer Wind.....</i>	120
16.6.	<i>Experiment 51: Kerze zwischen Plattenkondensator 1.....</i>	122
16.7.	<i>Experiment 52: Kerze zwischen Plattenkondensator 2 (bewegte Flamme).....</i>	124
16.8.	<i>Experiment 53: Zentripetalkraft am Drehschemel.....</i>	126
16.9.	<i>Experiment 54: Kerzenwippe.....</i>	128
16.10.	<i>Experiment 55: Tiefdruckgebiet mit Kerzen (MENNER).....</i>	130
16.11.	<i>Experiment 56: Rubens'sches Flammenrohr.....</i>	132
17.	Explosive Experimente (MENNER).....	134
17.1.	<i>Experiment 57: Kerzen durch Brett (NISTELBERGER).....</i>	134
17.2.	<i>Experiment 58: Wachsflammenwerfer.....</i>	136
17.3.	<i>Experiment 59: Implodierende Getränkedose (NISTELBERGER).....</i>	138
17.4.	<i>Experiment 60: Staubexplosion mit Lycopodium (NISTELBERGER).....</i>	140
17.5.	<i>Experiment 61: Haarsprayflammenwerfer (NISTELBERGER).....</i>	142
17.6.	<i>Experiment 62: Benzinbrandkerze (NISTELBERGER).....</i>	144
17.7.	<i>Experiment 63: Wunderkerze unter Wasser.....</i>	146

17.8.	<i>Experiment 64: Kettenreaktion</i>	148
17.9.	<i>Experiment 65: Sauerstoff als Brandbeschleuniger</i>	150
17.10.	<i>Experiment 66: Flamme und Orangenschale (NISTELBERGER)</i>	152
17.11.	<i>Experiment 67: Brennender Schaum</i>	153
17.12.	<i>Experiment 68: Brennendes Magnesium</i>	155
17.13.	<i>Experiment 69: Brennender Schneeball</i>	157
17.14.	<i>Experiment 70: Brennender Geldschein</i>	159
17.15.	<i>Experiment 71: Flaschengeist:</i>	161
18.	Experimente zur Auslöschung von Kerzen (MENNER)	163
18.1.	<i>Experiment 72: Auslöschen mit PET Flasche und Stickstoff</i>	164
18.2.	<i>Experiment 73: Die essbare Kerze</i>	166
18.3.	<i>Experiment 74: Essig und Backpulver als Feuerlöscher</i>	167
18.4.	<i>Experiment 75: Verbrennung einer Kerze in Luft und in Atemluft (NISTELBERGER)</i>	169
18.5.	<i>Experiment 76: Auslöschen mit Mineralwasser (NISTELBERGER)</i>	170
18.6.	<i>Experiment 77: Auslöschen mit flüssigem Stickstoff (NISTELBERGER)</i>	171
18.7.	<i>Experiment 78: Ausblasen hinter runder und eckiger Flasche</i>	172
18.8.	<i>Experiment 79: Ausblasen von Scherzkerze</i>	175
18.9.	<i>Experiment 80: Kerzenaquarium (NISTELBERGER)</i>	176
18.10.	<i>Experiment 81: Kerzenlift (NISTELBERGER)</i>	177
18.11.	<i>Experiment 82: Ei in eine Flasche (NISTELBERGER)</i>	179
18.12.	<i>Experiment 83: Auslöschen mittels mini Feuerlöscher (Scherzfeuerlöscher) (NISTELBERGER)</i>	180
18.13.	<i>Experiment 84: Kerzenlöschspirale und Kerzenlöscher Glocke</i>	182
18.14.	<i>Experiment 85: Kerze auslöschen mit Airbag</i>	184
18.15.	<i>Experiment 86: Kerze in Wasserstoff</i>	186
18.16.	<i>Experiment 87: Vortexkanone</i>	188
18.17.	<i>Experiment 88: Kerze unter drei Gläsern unterschiedlicher Größe (NISTELBERGER)</i>	190
18.18.	<i>Experiment 89: Auslöschen einer Kerzenflamme mittels Polarisationsfilter</i>	191
18.19.	<i>Experiment 90: Cola Mentos Fontäne (NISTELBERGER)</i>	193
19.	Abbildungsverzeichnis	195
20.	Literaturverzeichnis	200

1. Einleitung

Die Kerze, ein Gegenstand, der auf eine lange Geschichte zurückblickt. Schwer zu sagen, wann genau die Geburtsstunde dieses Lichtbringers war. Eines jedoch ist gewiss, Kerzen sind damals wie heute stille Begleiter unserer Gesellschaft. Das ganze Jahr über, egal zu welchen Anlässen, werden Kerzen in allen möglichen Farben und Formen angezündet. Während des Winters und Sommers versprühen sie Wärme, bringen eine gemütliche Atmosphäre und sind aufgrund ihrer speziellen Wahrnehmung nicht durch die modernen Leuchtartikel ersetzbar. Auch die Symbolik der Kerze in den Glaubenskulturen, sowie die vielen weiteren Einsatzgebiete, wo der altehrwürdige Lichtbringer gute Dienste verrichtet, zeugen davon, dass die Kerze als Leuchtmittel wohl noch mehrere Generationen überstehen wird. Ein Blick auf die Entwicklungsgeschichte zeigt uns, dass durch gezielte technische Eingriffe und Verbesserung, das einst stark rauchende und übelriechende Licht bereits in der Moderne angekommen ist und Duftkerzen oder Insektenkerzen nur zwei Beispiele dafür sind, dass Kerzen außer Licht ins Dunkel zu bringen, auch noch vielseitiger einsetzbar sind. Für die meisten Menschen mag diese kleine Flamme recht banal wirken. Für fast alle ist es einfach Feuer. Doch was ist Feuer? Wie kommt das Wachs in den Docht? Warum rußt die Flamme? Brennen Kerzen auch im Weltraum? Schon aus der Beantwortung dieser Fragen lässt sich ableiten, dass die Kerze weit mehr als ein kleiner Lichtbringer ist. Hinter ihr verbirgt sich eine Vielzahl physikalischer und chemischer Prozesse. In der folgenden Arbeit wird versucht, die physikalischen Aspekte der Kerze näher zu bringen und dabei immer wieder Analogien zur Physik des Alltags herzustellen. Nicht nur die Experimente über die Kerze selbst, sondern auch jene, bei denen der Lichtbringer in die Komparsenrolle schlüpft, sollen deutlich machen, wie vielseitig die Physik mit allen ihren spannenden Seiten sein kann. Dem Leser soll zunächst theoretisches Hintergrundwissen zum Thema Kerze vermittelt werden, ehe es danach in den Experimentierteil der Arbeit übergeht. Der Hintergrundgedanke dieser Arbeit war es, den Lesern ein möglichst breites Spektrum der Physik, mittels Kerzenexperimenten, näher zu bringen. Es werden nicht nur Kerzen selbst physikalisch beleuchtet, sondern sie dienen oft als Demonstrationsobjekt um physikalische Phänomene zu erklären. „Physik zum

„Angreifen“ und „Physik erleben“ waren mitunter Mottos nach denen Herr Prof. Pottlacher seine Weihnachtsvorlesung im Jahr 2012 gestaltete. Aus dieser Vorlesung geht der größte Teil der Ideen zu den Experimenten hervor. Kategorisch unterteilt sich die Arbeit in folgende Themengebiete:

- Experimente zur Kerze allgemein
- Experimente zur Kerzenflamme
- Experimente zur Lichttechnik
- Experimente zur Optik
- Experimente zur Bewegung von Kerzenflammen
- Experimente zum Anzünden von Kerzen
- Explosive Experimente
- Experimente zum Auslöschen von Kerzen

Das verwendete Bildmaterial stammt dabei zumeist aus Mitschnitten der Weihnachtsvorlesung 2012 oder aus den Labornachmittagen unter der Leitung von Herrn Prof. Pottlacher.

2. Definition Kerze

Eine Kerze ist „... ein mit Talg oder Wachs überzogener Docht, von Garn, welcher, wenn er angezündet wird, einen hellen Schein von sich giebet und einen verfinsterten Ort erleuchtet.“ (Universallexikon von 1738, nach Matthäi 2003, S. 13)

Beleuchtungsmittel aus fester Brennmasse, die einen Docht umgibt.“ (Falbe, 1997, S. 2138)

„Meist zylindrisch geformte Lichtquelle aus Paraffin, Stearin, Talg, Wachs u.s mit einem aus imprägniertem Baumwollfäden geflochtenen Docht in der Mitte.“ (Brockhaus, 1998, Stichwort: Kerze)

In der Alltagssprache wird für die Brennmasse verallgemeinert meist der Begriff Wachs verwendet, obwohl sie aus mineralischen, tierischen oder pflanzlichen Rohstoffen gewonnen werden kann. Auch Teelichter und Stundenbrenner gehören zu den Kerzen, da sich die Brennmasse in einem Behältnis befindet. Von Lampen und Laternen spricht man, wenn die Brennmasse flüssig ist. Fackeln, Wunder- oder Ohrenkerzen gehören ebenfalls nicht zur Gattung der Kerzen wie im obigen Teil beschrieben.



Abb. 1: Kerze (Pixabay)

3. Etymologie der Begriffe – Kerze, Wachs, Docht

Dass der Docht mitunter als wichtigster Teil der Kerze gilt, zeigt sich in der etymologischen Betrachtung. So kommt es, dass sich das Wort Kerze nicht etwa aus dem Lateinischen „cerceus“ oder „candela“ herleiten lässt, sondern von „charta“. Dies wurde ins Althochdeutsche übernommen und bedeutet so viel wie Papierblatt. Im konkreten Fall der Kerze steht es für ein Blatt der Papyrusstaude, welches gerollt als Kerzendocht verwendet wird. Diese Annahme wird dadurch unterstützt, dass Kerzen früher aus gewickelter, mit Öl getränkter Birkenrinde hergestellt wurden (vgl. Matz, S. 20).

Das deutsche Wort Kerze, welches im 8. Jahrhundert entstand, lässt sich zudem aus der lateinischen Sprache herleiten. „Candela“ und „cerata“ werden dabei mit Wachslicht übersetzt.

Wachs leitet sich vom lateinischen „cera“ ab. Dabei bedeutet „cerata“ übersetzt „aus Wachs bestehend“. Beim Betrachten anderer europäischer Sprachen wird klar, dass sich die Übersetzungen allesamt aus dem Lateinischen ableiten lassen. Die verschiedensprachigen Bezeichnungen für Kerze klingen dabei allesamt sehr ähnlich, egal ob die französische „chandelle“, die englische „candle“, oder die spanische „candela“. Der Begriff Wachs, so wie er in unserem Sprachgebrauch vorkommt, ist eine Weiterentwicklung des germanischen „wahsa“. Als „wahs“ wird ein Gewebe bezeichnet, beispielsweise die Waben von Bienen und bedeutet außerdem, fließen beziehungsweise schmelzen, was die Eigenschaften von Wachs beschreiben würde.

Der Begriff Docht geht auf das 10. Jahrhundert zurück und war eine Bezeichnung für die Litze eines Seils. Das lateinische „texere“ steht für zusammendrehen und beschreibt die Verarbeitung der einzelnen Fäden. „Tapor“ (engl. – Docht) stützt sich auf „tapurus“, welches eine Ableitung für Papyrus ist, einem Material, aus dem teilweise Dochte hergestellt wurden (vgl. Kluge 1953, Stichwort, Kerze, Wachs, Docht).

4. Geschichtlicher Hintergrund

Wann die Kerze „erfunden“ wurde ist heute schwer nachzuforschen. Waren es die Römer, die Griechen, die Ägypter oder andere Hochkulturen? Auch dies lässt sich schwer nachvollziehen. Die Kerze selbst ist eher ein Teil der Entwicklung von Beleuchtungsmittel als eine eigenständige Erfindung. Die Phönizier und Griechen waren jene Kulturen, welche bereits gebleichtes Wachs (*cera punica*) kannten, jedoch keine Kerze wie man sie sich heute vorstellen würde. Es handelte sich dabei eher um einen mit harz- oder wachsgetränkten Docht (vgl. Knapp, 1865, S. 501).

Der Ursprung des künstlichen Lichts liegt im Feuer. Menschen waren schon lange danach bestrebt die drei Kulturleistungen des Feuers, nämlich das Heizen, das Leuchten und das Kochen, zu nützen. Lange waren diese drei Eigenschaften in Form einer stationären Feuerstelle vereint. Im Laufe der Zeit hielt jedoch die mobile Beleuchtung Einzug, welche nicht mehr zentral dem Kochen beziehungsweise Heizen diene. Mit der Kenntnis darüber welche Hölzer am hellsten brannten, entwickelte sich so das Wissen über die Leuchtkraft bestimmter Hölzer. Dabei lässt sich die unterschiedliche Leuchtkraft auf den Harzgehalt des Holzes zurückführen. Über den brennend Kienspan, dessen Eigenschaften des Leuchtens und des Brennens von der Natur vorgegeben waren, war der erste große Entwicklungsschritt zur Kerze mit dem Aufkommen der Fackel getan. Durch einen gezielten technischen Eingriff konnten so die Leuchtkraft und die Leuchtdauer erhöht werden. Dabei wurde ein Holzsplit mit Pech oder Harz im oberen Teil angereichert. Diese keulen- oder zylinderförmige Verdickung diene als Brennstoff und das Holzsplit war demnach nur noch der Griff oder die Halterung (vgl. Schivelbusch, 1941, S. 12 - 13).

Fackeln dieser Form hielten sich über Jahrtausende bei allen Völkern. Im antiken Rom fanden die Fackeln unter freiem Himmel als Lichtspender ihre Verwendung, weil eine öffentliche Beleuchtung fehlte. Die nun transportable Beleuchtung in Form von Kienspänen und Fackeln hielt bis ins Mittelalter Einzug. Buchenspäne brannten am hellsten, Birkenespäne hatten die geringste Rußentwicklung, Kien (eine Art Kiefernholz) jedoch war trotz seiner starken Rußentwicklung das am liebsten verwendete Holz (vgl. Matz, 2000, S. 11).

Dass es aber bereits in der Steinzeit eine spezielle Art der Beleuchtung gab, darauf weisen archäologische Funde im Südwesten Frankreichs hin. In den Höhlen von

Dordogne wurden einfache Steinscheiben mit Vertiefungen und teils vorhandenen Griffstücken gefunden. Analysen ergaben Spuren von tierischen Fetten, welche als Brennstoff, kombiniert mit Flechten und Moosen, als erste Form von Dochten, die ältesten hergestellten Beleuchtungsmittel verkörpern (vgl. Matz, 2000, S. 29).

Der große Nachteil bei Fackeln war ihre Unhandlichkeit und ihr starkes Rußen. Der nächste Schritt in der Entwicklung waren Kerze und Öllampe. Sie galten als Verkleinerung oder Verfeinerung der Fackel, welche zum einen lange brannten und zum anderen sehr handlich und leicht zu entzünden waren. Der große Unterschied liegt im Detail. Die Fackel war Brennstelle und Brennstoff zugleich. Bei der Kerze oder der Öllampe hingegen, waren die beiden Funktionen räumlich voneinander getrennt. Die große Revolution in Sachen Technik war hierbei der Docht, welcher den Brennstoff getrennt aus einem Reservoir bezog. Aus Sicht der Wahrnehmungspsychologie entwickelte sich die Charakteristik der Flamme von der zerstörerischen Urgewalt am Beispiel des niederbrennenden Holzscheits, hin zu einem eleganten, ästhetischen, ruhigen Brennen der Kerze oder Öllampe. Die Flamme um den kaum wahrnehmbaren Docht wird ganz anders erlebt als jene der Fackel. Der Docht bleibt scheinbar unberührt. Lediglich der im Reservoir befindliche Brennstoff geht langsam und für den Beobachter kaum merklich zur Neige (vgl. Schivelbusch, 1865, S. 14).

Mittelmeerländer waren schon früh mit den Eigenschaften des Olivenöls vertraut und nutzten dieses als Brennstoff. In nördlichen Ländern war dieses Öl wenig, bis gar nicht bekannt und so kam es, dass das arme Volk Holzsplitter oder Leinenstreifen in Tierfett, Talg oder auch Bienenwachs tauchte. Auf die verschiedenen Brennstoffe wird in Kapitel 6 noch genauer eingegangen (vgl. Nowotnick, 2012, S. 35). Für den Einsatz von tierischen Fetten als Brennmasse waren vor allem die Engländer bekannt. Dafür verwendeten sie Walrat, was das gereinigte Fett aus dem Schädel des Pottwals war. Das sogenannte Japanwachs war ein Vertreter der pflanzlichen Fette zur Kerzenherstellung. Es wurde aus einer japanischen Pflanze gewonnen, fand jedoch nur geringe Verwendung. Beide Arten weisen sehr gute Brenneigenschaften auf und ähnlich der Bienenwachskerze hatten sie eine helle und klare Flamme.

Erst im 19. Jahrhundert patentierten Franzosen und Engländer deren neue Erfindungen im Bereich der Brennmassen. Das auf tierischen und pflanzlichen Fetten basierende Stearin zeichnete sich dabei durch eine helle und nahezu geruchlose

Verbrennung aus. Paraffin hingegen wird aus Braunkohle, Schieferöl oder Erdöl gewonnen. Kompositkerzen, wie sie auch heute noch produziert werden, setzen sich aus beiden oben genannten Bestandteilen zusammen. Stearin und Paraffin zeichnen sich auch durch sehr gute Verarbeitungseigenschaften aus, was im speziellen die industrielle Verarbeitung großer Stückzahlen erleichtert.

Auch der Docht blickt auf eine lange Geschichte zurück. Anfangs bestand dieser aus einem einzelnen Strang Leinen oder Binsen. Außerdem verbrannter er nicht vollständig, sodass das verkohlte Ende die Flamme zum Rußen brachte. Abhilfe verschaffte man sich dabei mit dem „Schnäuzen“ der Flamme. Darunter versteht man das gezielte Abschneiden des verbrannten Dochtendes mittels einer Lichtputz- oder Dochtschere aus Messing oder Eisen (vgl. Matz, 2000, S. 20). Moderne Dochte beugen der Gefahr des unkontrollierten Abbrennens bereits vor. Das Prinzip der selbstauslöschenden Kerzenflamme liegt darin, dass der Docht in einer bestimmten Höhe von einem nicht brennbaren Mantel umgeben ist. Erreicht die Flamme diesen Teil, verbrennt der Docht komplett, was zuerst eine Verkleinerung und danach das vollkommene Erlöschen der Flamme zur Folge hat. Tests haben ergeben, dass sich dafür Aluröhrchen mit einer Höhe von rund 10 mm eignen (vgl. Berthold & Ludwig, 2007).

4.1. Experiment 1: Kerzen schneuzen

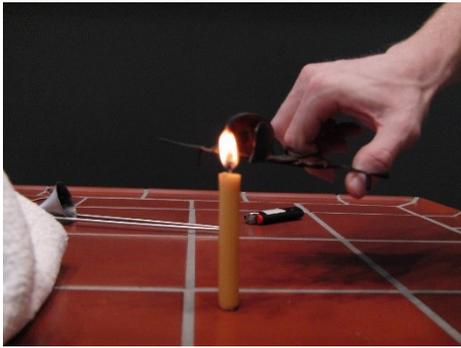


Abb. 2: Dochtschere mit Auslöscher

Material:

- 2 x Kerze
- 2 x Dochtschere (mit und ohne Auslöscher)
- Anzündmittel

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Beide Kerzen werden zunächst angezündet und man lässt diese für kurze Zeit brennen. Nun schneidet man mit der ersten Dochtschere den Docht ca. bei der Hälfte ab und kann erkennen, dass dieser noch kurz weiterbrennt ehe er erlischt. Schneuzt man den zweiten Docht mit der anderen Schere, welche quasi einen „Auslöscher“ montiert hat, so wird der brennende Docht gleich darin verwahrt.

Physikalische Erklärung:

Grund dafür, dass das erste Dochtstück weiterhin brennt, ist, dass sich noch flüssiges Wachs darin befindet, weiterhin verdampft und die Flamme aufrecht hält. Schon nach kurzer Zeit jedoch ist das Reservoir aufgebraucht und es steht keine Brennmasse mehr zur Verfügung. Bei der Schere mit Auslöscher liegt das Prinzip im Ersticken der Flamme und ist daher die etwas noblere Lösung.

Bemerkung:

Wurde der Docht nicht geschneuzt, verminderte dies die Helligkeit der Flamme schlagartig, egal aus welchem Material sie gefertigt war. Mit dem Flechten einzelner Dochtstränge und daraus resultierender besserer Verbrennung war man einem optimalen Brennvorgang ein Stückweit näher gekommen, ehe man ab den 1820er Jahren Dochte aus gebeizter oder imprägnierter Baumwolle herstellte (vgl. Matz,

2000, S. 20). Das Schneuzen, oder auch „Licht putzen“, erfordert äußerste Geschicklichkeit, denn schneidet man zu viel Docht ab, vermindert auch dies die Helligkeit. Kerzen aus bestem Londoner Talg musste man früher ungefähr jede halbe Stunde schneuzen, es konnte aber durchaus auch alle fünf Minuten notwendig sein. Zu erwähnen sei auch, dass „Schneuzer“ oder „Lichtputzer“ ein eigener Beruf gewesen war (vgl. Büll, 1977, S. 560).

4.2. Die Kerze und das Christentum

An dieser Stelle soll ein kurzer Exkurs zur Symbolik der Kerze und ihres Lichts folgen. In enger Verbindung mit der Kerze steht die römisch-katholische Kirche. Zur Zeit der Verfolgung war es den Gläubigen nur gestattet nachts den heiligen Gottesdienst ab zu halten. Dabei kamen Öllichter und Kerzen mit Bienenwachs als Brennmasse zum Einsatz. Es ist jedoch unklar ob es sich um Kerzen, wie wir sie heute kennen, handelt. Jedoch wird der Begriff „cereus“ in Schriften des Konzils, beispielsweise über den Ablauf von Messen, erwähnt (vgl. Angeletti, 1980, S. 35). Dem katholischen Glauben zufolge gilt das Bienenwachs als Produkt jungfräulicher Arbeitsbienen und ist demnach vergleichbar mit dem Leib Christi. Der Docht verkörpert dabei die Seele Christi und die reine Flamme soll den heiligen Geist symbolisieren. Laut Überlieferungen mussten Kirchenkerzen eine gelbe bis goldgelbe Färbung aufweisen, um garantieren zu können, dass sie aus Bienenwachs gefertigt wurden. Das später ebenfalls bekannte Paraffin war in der kirchlichen Institution nicht gern gesehen (vgl. Nowotnick, 2012, S. 35). Allmählich änderte sich auch diese Sichtweise und Kerzen aus gebleichten Wachs, beispielsweise Paraffin, gewannen an Bedeutung. Diese werden bis heute meist bei christlichen Festen verwendet. Die gelben, ungebleichten Lichtbringer werden eher bei Totenmessen, Trauerfeiern, aber auch an Bußetagen und am Karfreitag entzündet. Die bedeutendste und zugleich größte Kerze ist die Osterkerze. Ihre Geschichte geht bereits auf das 5. Jahrhundert zurück und sie verkörpert quasi die christliche Kerzen- und Wachssymbolik (vgl. Büll, 1977, S. 35 - 36).

5. Herstellungsarten

Für die häusliche und handwerkliche Kerzenherstellung verwendete man früher Talg und Unschlitt als Brennmasse. Talg und Unschlitt, welches aus unverwertbaren Eingeweidefetten gewonnen werden kann, war auch für das bescheidene Volk zugänglich. Im Herbst, der Hauptschlachtzeit, konnte man besonders viel dieses Rohstoffes gewinnen. Durch Auslassen des Fettes wurde zunächst versucht, die schnell verderblichen Substanzen heraus zu filtern. Da man dies aber nur mit mäßigem Erfolg vollbrachte, trugen diese Kerzen aufgrund faulender Inhaltsstoffe einen üblen Geruch mit sich. Die Verbrennung geschah ungleichmäßig, was ein starkes Qualmen und Rußen mit sich brachte. Neben Bienenwachs revolutionierten, wie in Kapitel 6 beschrieben, später die Stoffe Stearin und Paraffin die Produktion von Kerzen (vgl. Angeletti, 1980, S. 53).

Im Laufe der Zeit bediente sich die Kerzenherstellung einiger Methoden. Durch die technologische Entwicklung konnten sehr bald Kerzen in großen Stückzahlen produziert werden. Jedoch unterscheiden sich die Grundtechniken der Herstellung, egal ob für den Eigengebrauch oder zum Verkauf, trotz Einsatz von Maschinen kaum. Dabei unterscheidet man die Herstellungsarten: Kneten, Gießen, Ziehen, Tauchen, Angießen und Pressen (vgl. Matz, 2000, S. 23).

5.1. Kneten

Das wohl älteste, aber heute noch praktizierte, Verfahren zu Kerzenherstellung ist das Kneten beziehungsweise Rollen. Um das Wachs formbar zu machen, wird es in einem Wasserbad langsam erwärmt. Danach wird es zu dünnen Platten ausgerollt. Anschließend wird der mit Wachs mehrmals imprägnierte Docht damit umwickelt. Die Fuge der letzten Schicht wird dabei mittels Kneten und Rollen geschlossen. Der Vorteil besteht darin, besonders kunstvolle Kerzen anfertigen zu können, wie zum Beispiel Oster- oder Altarkerzen. Zu beachten ist bei dieser Methode, dass sowohl beim Erweichen, als auch beim Ausrollen und Formen, Wasser und Luft in die Kerzenmasse gelangen.

5.1.1. Experiment 2: Rollen einer Bienenwachskerze



Abb. 3 a, b, c: Bienenwachskerze Rollen a) Docht eindrücken b) Wachsplatte rollen
c) Fertige Bienenwachskerze

Material:

- Docht
- Bienenwachsplatte mit Zellstruktur

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Generell empfiehlt es sich für die Arbeit eine Arbeitsplatte zu verwenden, da das Bienenwachs zum einen leicht am Tisch oder an Werkzeugen haftet, andererseits auch Schneidwerkzeug verwendet wird. Damit sich die Bienenwachsplatten fürs Rollen eignen, müssen sie zumindest auf eine Temperatur von 25 °C gebracht werden, da sie bei der Verarbeitung sonst brechen würden. Sofern man einen noch nicht gewachsenen Docht hat, muss der unbehandelte Docht zuvor noch in flüssiges Wachs getaucht werden. Der Zuschnitt der Platten entscheidet später über die Form, im speziellen die Höhe der Kerze. Zu Beginn wird der vorbereitete Docht leicht in die Wachsplatte gedrückt und die erste Wand gerollt. Je nach Kerzenstärke führt man diesen Arbeitsschritt dementsprechend oft durch. Um die typische abwärtsführende Kegelform zu erhalten, muss man die Bienenwachsplatte von Beginn an etwas asymmetrisch rollen.

Physikalische Erklärung:

Die meisten Werkstoffe werden mit sinkender Temperatur spröder, so auch das Bienenwachs. Durch das Anwärmen wirkt man diesem Effekt entgegen. Würde das Wachs zu kalt sein, käme es zum Bruch der Platte bei der Verformung.

Bemerkung:

Für eine gute Verarbeitung sollte auch die Raumtemperatur etwa bei 25 °C liegen. Sollte es zu Bruch einer oder mehrerer Wachsplatten kommen, stellt das kein Problem dar, da sie von der darauffolgenden Schicht überdeckt werden. Einzig die äußerste Schicht sollte im Ganzen bleiben. Generell sind der Kreativität beim Kerzenrollen kaum Grenzen gesetzt. Einerseits werden die Formen wie zylindrisch, kegelförmig oder peitschenförmig von der Rolltechnik bestimmt, andererseits kann man gerollte Kerzen durch Einsatz verschiedenfärbiger Bienenwachsplatten färbig nach Belieben gestalten. Auch das weitere Verzieren mittels zugeschnittener Formen aus Wachs, oder Anbringen von Emblemen ist ohne großen technischen Aufwand möglich (vgl. Nowotnick, 2012, S. 42 - 48). Es empfiehlt sich beim Verarbeiten einen Dochthalter zu verwenden, da sonst der brennende Docht zum Ende hin umkippen kann und dies zu einem unkontrollierten Brennvorgang führt.

5.2. Pressen

Ähnlich dem Kneten wird jedoch beim Pressen anstatt der Hände, bereits ein Werkzeug oder eine mechanische Vorrichtung verwendet. Meistens bedient man sich dabei einer zweiteiligen Form, in welche man das vorzugsweise weiche Paraffin inklusive Docht einlegt. Mittels Wasserdampf kann man den Wachsklumpen auf Temperatur halten und anschließend presst ein Kolben das Wachs durch einen konischen Zylinder in die Form. Zum Ende hin kühlt die geformte Kerze im Wasserbad aus und erstarrt. Der große Vorteil besteht nun darin, jegliche Formen von Kerzen in größeren Stückzahlen zu produziere (vgl. Büll, 1977, S. 710).

5.3. Strangpressen

Das Strangpressverfahren wird fast ausschließlich für die Erzeugung dicker Kerzen verwendet. Unterteilt wird es in zwei Verfahren. Ersteres orientiert sich an der Kunststoffverarbeitung. Das plastische Wachsmaterial gelangt dabei, ähnlich dem Kunststoffgranulat, in einen konischen Kompressionsraum und wird komprimiert. Kurz bevor es durch das beheizte Ende des konische Teils austritt, wird der Docht hinzugefügt.

Als Ausgangsprodukt des zweiten Strangpressverfahrens gilt flüssiges Wachs. Es wird auf eine von innen gekühlte Walze aufgetragen und anschließend abgeschabt. Das plastische Wachsmaterial wird über eine Doppelschneckenpresse durch eine Lochscheibe in den konischen Kopf der Maschine befördert. Am Ende des Kopfes wird wiederum der Docht zugeführt und es können verschiedene Stärken der Kerze mittels variablem Kaliber herausgepresst werden (vgl. Büll, 1977, S. 710).

5.4. Pulverpressen

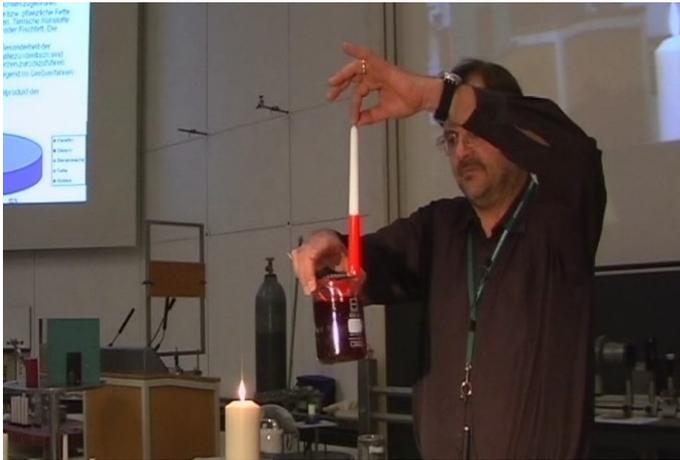
Eine Herstellungsmethode, welche zumeist bei Tee- beziehungsweise Nachtlichtern Verwendung findet, ist das sogenannte Pulverpressen. Dabei erzeugt ein Sprühturm

Pulver, welches aus Wachs besteht. Danach wird dieser Grundstoff in eine Form mit Ober- und Unterstempel befördert und in die für Teelichter typische Zylinderform gepresst. In der Mitte des Zylinders befindet sich dabei ein Loch, in welches darauffolgend der Docht eingebracht wird. In der heutigen Zeit geschieht dies voll automatisch und ist Teil der Produktionskette auf dem Weg zu den verkaufsfertigen Packungen von Teelichtern. Diese Herstellungsmethode ist mitunter die günstigste und vor allem rascheste. Erkennen kann man eine gepresste Kerze daran, dass sich der Docht sehr einfach herausziehen lässt, da er wie oben angeführt, erst nachträglich eingesetzt wird (vgl. Büll, 1977, S. 712).

5.5. Tauchen

Das recht einfache Prinzip des Tauchens oder Tunkens ist bereits sehr alt. Dabei wird ein Docht mehrmals hintereinander in ein Becken mit flüssigem Wachs getaucht. Jedes Mal wenn man den Docht herauszieht, erstarrt die neue Schicht Wachs um diesen. Dabei kommt es zur typischen Kerzenform, welche unten dicker und zum Docht hin dünner ist. Besondere Bedeutung erhielt dieses Verfahren bei der Herstellung von Talgkerzen. Um mehrere Kerzen zeitgleich zu produzieren, befestigt man einfach mehrere Dochte nebeneinander. Zu beachten ist dabei, dass die Geschwindigkeit des Eintauchens beziehungsweise Herausziehens richtig gewählt wird und konstant bleibt, sowie das flüssige Wachs auf optimaler Temperatur gehalten wird, da sonst der Wachsfilm stellenweise abreißen könnte. Auch bei diesem Verfahren hielt der technische Fortschritt Einzug und die zunächst akribische Handarbeit wurde vollends automatisiert (vgl. Büll, 1977, S. 713).

5.5.1. Experiment 3: Kerzen tauchen



**Abb. 4: Tauchen einer Paraffinwachskerze
(Weihnachtsvorlesung 2012)**

Material:

- Topf für Wasserbad
- Kleinerer Topf für das Wachs
- Wachs
- Docht
- Abdeckfolie oder Papier

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zunächst wird jener Topf, welcher als Wasserbad fungiert, erhitzt. Danach taucht man den zweiten, kleineren Topf samt dem vorerst festen Wachs in das heiße Wasser, um es zu schmelzen. Die Höhe des Schmelzgefäßes wird von der beabsichtigten Kerzenlänge bestimmt. Währenddessen wendet man sich dem Zuschneiden des Dochts zu. Dabei soll auf ausreichende Überlänge, verglichen zur Kerzenlänge, geachtet werden. Wichtig ist es auch den Docht am Endstück zu kneten, um ein späteres Abrutschen der Kerze zu verhindern. Nun taucht man den Docht für einen kurzen Augenblick in das Wachs, zieht ihn folglich wieder heraus und lässt ihn abkühlen. Ist das Wachs erstarrt, wiederholt man diesen Vorgang bis zur gewünschten Dicken der Kerze.

Physikalische Erklärung:

Grundsätzlich findet hier ein Übergang von einem flüssigen zu einem festen Zustand statt, das Erstarren. Zunächst schwingen die Moleküle aufgrund zugeführter Energie sehr heftig (flüssiger Zustand). Durch das Abkühlen und Erstarren schwingen diese nur noch leicht um ihre Gleichgewichtslage in einem Kristallgitter (fester Zustand). Dieser Vorgang basiert auf dem Prinzip des Wärmetransports, genauer dem des Wärmeübergangs. Bei allen Arten des Wärmtransports gilt die natürliche Transportrichtung der Wärmeenergie von höherer zu niedriger Temperatur. Wenn flüssige oder gasförmige Körper in Berührung mit festen Körpern anderer Temperatur kommen, geben diese entweder Wärmeenergie an diese ab, oder nehmen sie auf. Dieser Prozess wird Wärmeübertragung genannt (vgl. Kuchling, 2014, S. 321 - 324).

Bemerkung:

Um zwei Kerzen gleichzeitig zu tauchen, bietet es sich an den Docht zunächst weit über die doppelte Kerzenlänge zu zuschneiden. Anschließend werden die beiden Dochtenden zugleich eingetaucht. Dabei ist darauf zu achten, dass sich die beiden Kerzenstränge nicht berühren. Ist anstatt der typischen konischen Kerzenform eine zylindrische Kerze erwünscht, so zieht man den Kerzenstrang nach jedem Tauchvorgang durch ein Lochblech mit gewünschtem Durchmesser (vgl. Nowotnick, 2012, S. 94 - 95).

Sicherheitshinweis:

Das Kerzenwachs darf niemals direkt in einem Topf erhitzt werden. Dadurch kann es unkontrolliert heiß werden und Feuer fangen. Gelöscht werden sollte dann ausschließlich durch Ersticken.

5.6. Ziehen

Das Prinzip des Erstellens einzelner Wachsschichten ist beim Kerzenziehen dasselbe. Entgegen dem senkrechten Eintauchen beim Tauchen, wird hier der endlose Dochtstrang waagrecht durch das Wachsbad gezogen und Anschließend auf Rollen gelagert. Durch Wiederholen des Vorgangs kann die Kerze auf die gewünschte Dicke gebracht werden, welche zusätzlich durch eine Lochscheibe begrenzt wird. Der so gewonnene Wachsstrang kann daraufhin zur Weiterverarbeitung beispielsweise zerschnitten werden. Problematisch wird dieses Verfahren jedoch bei dickeren Kerzen, da sich diese nichtmehr um die Trommel winden lassen, oder aber bei längeren Kerzen, bei denen die Biegung durch die Trommeln schwer zu korrigieren war (vgl. Matz, 2000, S. 24).

5.7. Gießen

Das Kerzengießen ist mitunter eines der ältesten Verfahren zur Kerzenherstellung, Aber auch die aktuelle Industrie stellt die Lichtspender nach diesem Prinzip her. Ähnlich simpel wie die zuvor erwähnten Techniken basiert diese Methode darauf, das heiße flüssige Wachs in eine Form zu gießen und aushärten zu lassen. Dabei wird der Docht in die Mitte der Form gehängt. Von den anfänglichen, zweiteiligen Handformen, bis hin zu modernsten Gießmaschinen der heutigen Zeit, war es ein langer Weg. Als Material für die Formen eignet sich bei Stearin, reines Zinn, sowie bei Kompositionen oder Paraffin eine Zinnlegierung. Grundsätzlich wird die Form vor dem Eingießen erwärmt, ehe sie darauffolgend gekühlt wird. Nachdem das Wachs erstarrt ist, werden die Formen meist auseinander genommen und die fertige Kerze herausgenommen. Neben den oben genannten Materialien verwendet man heutzutage ebenso Kautschukformen. Ihr Vorteil besteht darin, dass sich die Kerzen aufgrund der Elastizität besonders leicht herauslösen lassen (vgl. Büll, 1977, S. 718).

5.7.1. Experiment 4: Gießen einer Kerze



Abb. 5: Gießen von Kerzen
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Wachs (Paraffin)
- Glasbehälter
- Topf mit heißem Wasser
- Dochte
- Kerzengießform

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zu Beginn wird das Paraffin mittels Wasserbad im Glasbehälter zum Schmelzen gebracht. Während dem Schmelzen werden die Dochte auf etwa die Länge der Kerzenform abgeschnitten und in die Mitte der jeweiligen Form gehängt. Für dieses Vorhaben bieten sich vor allem jene Kerzenformen, wie sie in Abb. 5 ersichtlich sind, an. Nun gießt man das flüssige Paraffin in die Form und lässt es abkühlen. Dabei stellt man fest, dass sich nach dem Aushärten eine typische Mulde gebildet hat.

Physikalische Erklärung:

Im Allgemeinen dehnen sich Stoffe bei Erwärmung aus. Dies gilt sowohl für Festkörper, Flüssigkeiten oder Gase. Dabei gilt, dass die Änderung des Volumens $\frac{dV}{V}$ proportional zur Temperaturdifferenz ΔT ist und zwar über den Volumenausdehnungskoeffizienten β :

$$\frac{dV}{V} = \beta \Delta T \quad (5.1)$$

Wie stark sich ein Stoff dabei ausdehnt, hängt vom sogenannten Volumenausdehnungskoeffizienten β ab, welcher wie folgt definiert ist:

$$\beta = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta V/V}{\Delta T} = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (5.2)$$

Bei konstantem Druck ist der Volumenausdehnungskoeffizient β demnach vom Quotienten aus relativer Volumenänderung $\frac{dV}{V}$ und Temperaturdifferenz dT abhängig (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2009, S. 535).

Beim Abkühlen findet genau der gegenteilige Prozess statt und das Wachs zieht sich zusammen, was einen Volumenschwund zur Folge hat. Dieser manifestiert sich meist durch die Ausbildung eines Trichters.

Bemerkung:

Die bei der Abkühlung entstehende Mulde kann durch nochmaliges aufgießen mit heißen Wachs ausgeglichen werden. Für den häuslichen Gebrauch können auch Alltagsgegenstände wie Dosen, Flaschen oder Gläser als Kerzengießformen verwendet werden.

5.8. Angießen

Eine kaum noch angewandte Technik findet sich im sogenannten Angießen wieder. Dabei wird das flüssige Wachs immer wieder mittels Schöpflöffel vom Docht an übergossen. Um eine symmetrische Form gewährleisten zu können, befindet sich die Kerze auf einer drehenden Apparatur, worunter sich das flüssige Wachs für das Übergießen befindet. Da die Kerze, ähnlich wie beim Tauchen, eine konische Form annimmt, muss diese nach einiger Zeit umgedreht werden. Die umständliche, mühevoll Arbeit setzt sich in heutiger Zeit nur noch selten durch (vgl. Büll, 1977, S. 717).

5.9. Die Weiterverarbeitung von Kerzen

Einst und heute sind der Weiterverarbeitung von Kerzenrohlingen kaum Grenzen gesetzt. Ob schlichtes Bemalen, oder das Aufbringen von Hand gefertigten, aus Wachs bestehende Emblemen, bis hin zu Gravuren finden bei der Weiterverarbeitung viele Techniken ihre Anwendung. Das Ziel ist ein Stück mehr Individualität und eine persönliche Note. Abhilfe verschaffen unterdessen Bohr- oder Fräsmaschinen, sowie Gerätschaften zum Färben von Kerzen. Früher oft in akribischer Handarbeit gestaltet, stützt man sich heute auf computergesteuerte Anlagen, welche die Weiterverarbeitung von Kerzen in hohen Stückzahlen ermöglichen.

6. Bestandteile einer Kerze

Die Rohstoffe die für eine Kerze gebraucht werden, werden unter den Sammelbegriff Wachs geführt. Diese können mineralischen, tierischen oder pflanzlichen Ursprungs sein.

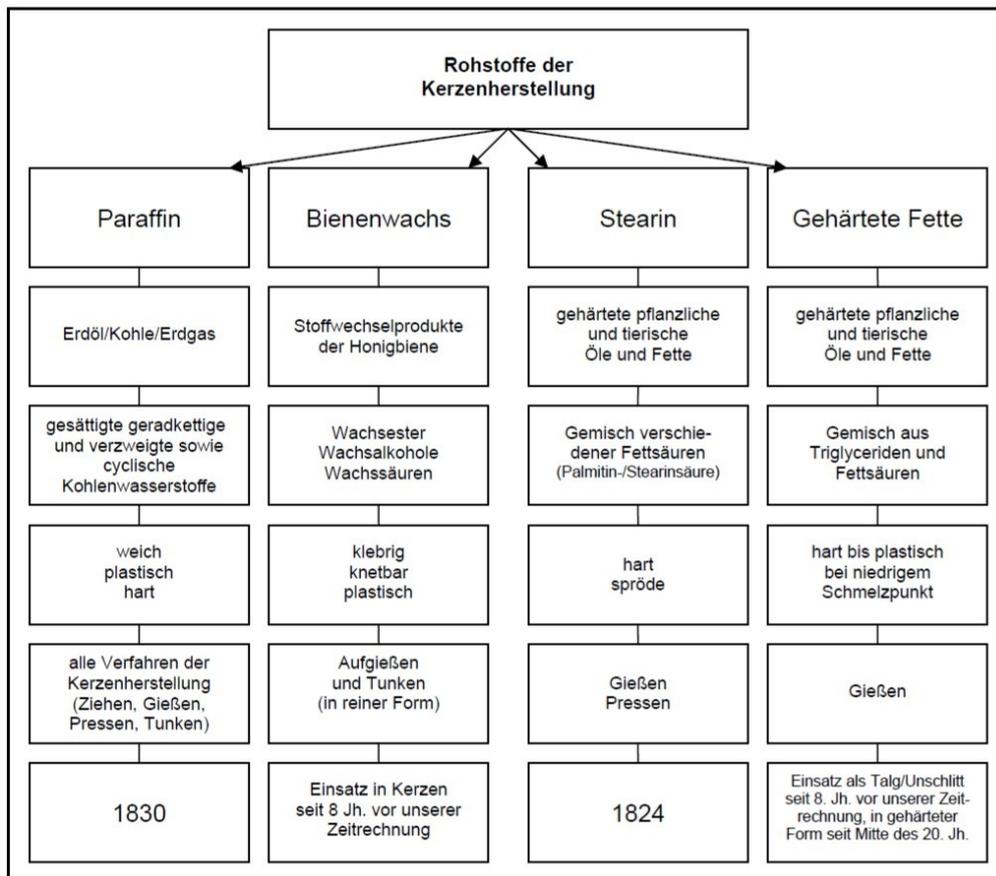


Abb. 6: Rohstoffe der Kerzenherstellung (Matthäi & Petereit 2003, S. 6)

Sie besitzen eine Reihe gemeinsamer physikalischer Eigenschaften wie in Abb. 6 gut zu sehen ist. Heutzutage wird zur Kerzenherstellung hauptsächlich Paraffin verwendet, da Paraffin ein Rohstoff ist, der reichlich vorhanden ist und zudem auch für alle gängigen Herstellungsverfahren genommen werden kann (Abb. 7).

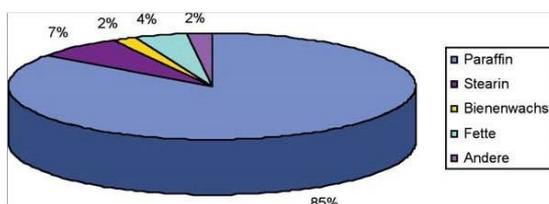


Abb. 7: Anteil Kerzenrohstoffe (Matthäi & Petereit 2003, S. 7)

6.1. Paraffin

Paraffin besteht aus geradekettigen, verzweigten und gesättigten Kohlenwasserstoffen, die auch als Alkane bezeichnet werden. Sie bestehen nur aus den Elementen Kohlenstoff und Wasserstoff. Sogenannte harte Paraffine haben ihren Schmelzpunkt bei 50 - 60 °C, die weichen bei etwa 45 °C. Dieser Rohstoff, der geruchlos, brennbar, ungiftig und in seiner Endform weiß ist, wird hauptsächlich aus Rohöl gewonnen (vgl. Nowotnick, 2012, S. 27). Das Rohöl wird zuerst destilliert, dann entölt, filtriert und dann noch mehrfach raffiniert. Bei der Destillation werden dabei unterschiedliche Destillationsfraktionen herausgetrennt, um die unterschiedlichen Schmelzpunkte bei den Kerzen zu erreichen. Damit Paraffin aus toxikologischer Sicht unbedenklich bleibt unterliegt es ständigen Qualitätskontrollen (vgl. Matthäi & Petereit, 2003, S. 7 - 8).

6.1.1. Experiment 5: Dichteverhalten von Paraffin und Wasser

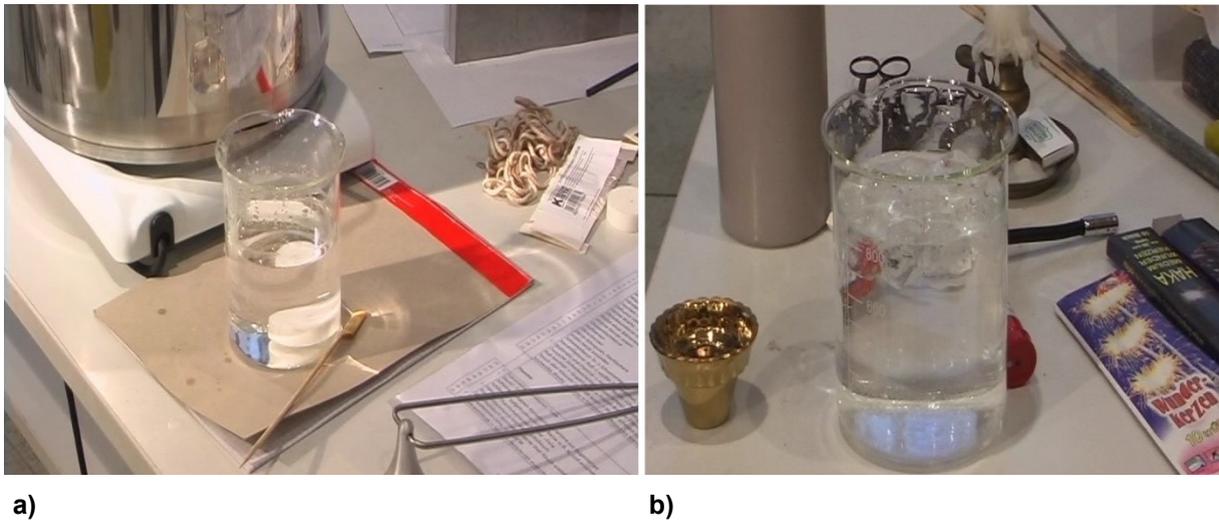


Abb. 8 a, b: Dichte Paraffin und Wasser im Vergleich a) Festes Paraffin sinkt in flüssigen Paraffin zu Boden b) Eis schwimmt im Wasser an der Oberfläche (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Topf mit heißem Wasser
- 2 x Glasgefäß
- 15 Teelichter (Paraffin)
- Eiswürfel

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Um das Paraffin zu verflüssigen, gibt man die Teelichter mit entferntem Docht in ein Glasgefäß und taucht dieses in heißes Wasser, um sie zu schmelzen. Das zunächst weiße, feste Paraffin wandelt sich dabei in transparentes, flüssiges Paraffin um. Wichtig dabei ist die Temperatur des Wassers, welche sich über 60 °C befinden sollte, da Paraffin wie in Kapitel 6.1 einen Schmelzpunkt zwischen 45 °C und 60 °C aufweist. Nach dem Schmelzvorgang gibt man ein festes Teelicht in das geschmolzene Wachs und stellt fest, dass es zu Boden sinkt. Als Vergleich wird das zweite Glasgefäß mit Wasser gefüllt und Eiswürfel hinzugefügt. Dabei stellt man fest, dass die Eiswürfel obenauf schwimmen. Es soll dabei das unterschiedliche Dichteverhalten der beiden Fluide bzw. Festkörper veranschaulicht werden.

Physikalische Erklärung:

Stoffe befinden sich im Allgemeinen in den Aggregatzuständen fest, flüssig oder gasförmig. Dabei nimmt die Dichte nach oben genannter Reihenfolge in der Regel ab. Ist die mittlere Dichte eines Körpers größer als jene des Fluids so geht dieser unter. Die Dichte ist auch temperaturabhängig. Je kälter ein Feststoff, eine Flüssigkeit oder ein Gas, desto dichter werden diese. Das relativ heiße flüssige Paraffin weist demnach eine geringere Dichte auf als das kältere feste Paraffin in Form des Teelichts und es sinkt deshalb zu Boden. Wasser hingegen verhält sich unter normalen Atmosphärendruck etwas anders. Es hat bei circa 4 °C das kleinste Volumen, also die größte Dichte. Darunter nimmt die Dichte wieder ab. Dieses Verhalten wird auch Anomalie des Wassers genannt.

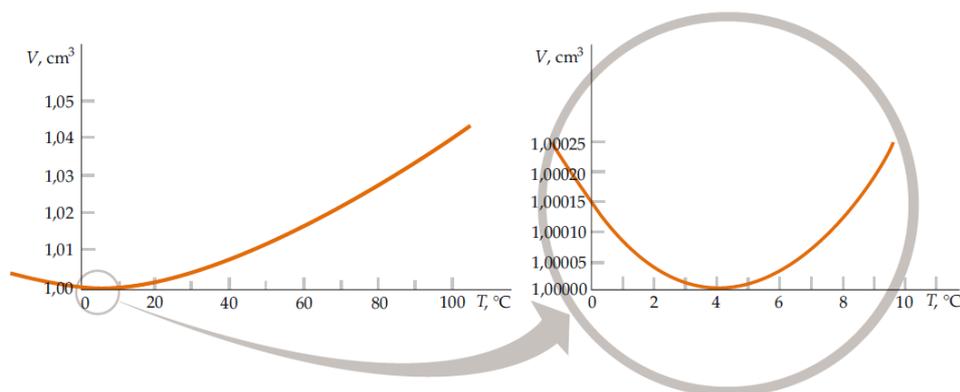


Abb. 9: Temperaturabhängigkeit des Volumens von 1 g Wasser (Tipler, Mosca, Wagner, 2009, S. 373)

Bemerkung:

Wichtig beim Schmelzvorgang ist, das Paraffin kontrolliert in einem Wasserbad zu schmelzen und dies sollte nie in einem Gefäß direkt auf dem Herd oder bei offener Flamme erfolgen. Das Wachs könnte dabei zu heiß werden und sich unter Umständen entzünden. Die Dichte-Anomalie des Wassers macht sich auch die Natur zu Nutze. In Gewässern mit ausreichender Tiefe wird es am Grund immer eine Temperatur von 4 °C geben. Im Sommer stellt sich mit Ausnahme der obersten Schicht eine stabile Schichtung von Temperaturzonen eine, bis zur 4 °C Grenze am Grund. Beim Übergang zum Winter durchmischt sich dieser Zustand, ehe sich

danach wieder eine stabile Schichtung einstellt, welche beispielsweise den Fischen die Möglichkeit gibt zu überwintern (vgl. Merkl, 2008, S. 40).

6.2. Stearin

Nur sieben Prozent der heutigen Kerzen bestehen aus Stearin, was daran liegen mag, das Stearin, gewonnen aus unterschiedlichen Fettsäuren (tierisch oder pflanzlich), teurer ist als das billigere Rohöl, aus dem Paraffin besteht. Die Hauptanteile dieser Fettsäuren sind Palmitin und Stearinsäure. Diese Stearinsäure wird heutzutage hauptsächlich aus Palmöl gewonnen. In früheren Zeiten (ab 1825), wurde die Stearinsäure aus auch tierischen Fetten hergestellt (vgl. Nowotnick, 2012, S. 28 - 29). Der Erweichungs- sowie Schmelzpunkt der Stearinkerzen liegt ungefähr im selben Temperaturbereich, was zu einer sehr guten Temperaturstabilität führt, anders als bei Paraffinkerzen, bei denen der Erweichungs- und Schmelzpunkt bei ca. 15 °C Temperaturdifferenz liegt. Stearinkerzen können deshalb nur über Gießverfahren hergestellt werden, die bei 52 – 60 °C ihren Erstarrungspunkt haben (vgl. Matthäi & Petereit, 2003, S. 9 - 10).

6.3. Gehärtete Fette

Bei einem Anteil von 4 % bei der Kerzenherstellung machen gehärtete Fette die aus einer Mischung Triglyceriden und verschiedenen Fettsäuren bestehen nur einen kleinen Teil aus. Schon früher wurden die Kerzen aus Fetten hergestellt, doch damals rußten sie sehr stark, was einen üblen Gestank mit sich brachte. Durch neuere Verfahren können diese Unannehmlichkeiten verhindert werden, indem man sie durch Auspressen, Entfernen der Schleimstoffe und darauffolgender Fetthärtung durch Hydrierung in neue weiße und sehr harte Produkte überführt. Wiederum wird für diese Art der Herstellung hauptsächlich Palmöl verwendet. Diese Kerzen sind hauptsächlich im kirchlichen Gebrauch zu finden, wie zum Beispiel bei Grablichtern (vgl. Matthäi & Petereit, 2003, S. 11).

6.4. Bienenwachs

Der älteste Kerzenrohstoff, das Bienenwachs, ist ein reines Naturprodukt, das aus den Wachsdrüsen der Bienen kommt. Dieses Wachs dient als Baumaterial für die Bienen und wird zum Wabenbau eingesetzt. Das Wachs ist in seiner Reinform weiß und transparent. Die gelbliche Farbe bekommt das Wachs erst durch den späteren Kontakt mit fettlöslichen Bestandteilen des Pollens und durch den Honig. Gewonnen wird dieses Wachs durch Ausschmelzen der Waben. Das Wachs kann dabei unterschiedliche Farben aufweisen je nachdem wie alt und woher das Bienenwachs kommt und es wird dann über bestimmte Reinigungsverfahren, wie durch beispielsweise Klären und Filtern zu reinem Bienenwachs verarbeitet. Da es dadurch aber chemisch unverändert bleibt, behält es seinen typischen Honiggeruch und die Farben schwanken zwischen gelb und beige. Der Schmelzpunkt des Bienenwachses liegt zwischen 62 – 66 °C und es besteht zu 70 – 80 % aus Wachsester, welcher sich wiederum zu einem großen Teil aus Palmitinsäure und Wachsalkoholen zusammensetzt (vgl. Nowotnick, 2012, S. 16 - 17).

6.5. Docht

Neben den verschiedenen Wachssorten braucht man noch eine Sache damit etwas als Kerze gilt und dies wird auch als Seele einer Kerze bezeichnet. Es handelt sich um den Docht. Erst das richtige Verhältnis zwischen dem Wachs und der Größe des Dochts ist ausschlaggebend für eine gute Kerze und ein wichtiger Indikator für eine qualitativ hochwertige Kerze. Zur Herstellung des Dochts werden hauptsächlich Baumwollfasern genommen, die entsprechend ihrem Einsatzzweck, mit verschiedenen anorganischen Verbindungen präpariert werden. Diese anorganischen Verbindungen werden dazu gebraucht, dass sich Mikroschmelzperlen bilden, die beim Auslöschen der Flamme verhindern, dass der Docht weiterglüht. Die Stabilität und das Saugverhalten des Dochts hängen von Fadenanzahl, Fadenstärke und Flechtart ab und sogar die Krümmung des Dochts während dem Brennen kann durch Zuführen spezieller Fäden beeinflusst werden (vgl. Matthäi & Petereit, 2003, S. 12).

Doch die wichtigste Aufgabe eines Dochts ist der Transport des Wachses zur Flamme. Die genaue Beschreibung des Verbrennungsvorganges folgt in Kapitel 7.

6.5.1. Experiment 6: Tafelkreide als Docht



Abb. 10: Tafelkreide als Docht

Material:

- Tafelkreide
- Kleiner Behälter
- Lampenöl

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Dies ist ein Modellexperiment um zu zeigen, wie ein Docht bei einer Kerze funktioniert. Wichtig ist es, im Vorhinein zu erwähnen, dass Kreide selbst nicht brennbar ist. Man gibt ein Stück davon in den Behälter und gießt vorsichtig Lampenöl hinein und wartet bis sich die Kreide mit dem Öl vollgesogen hat. Wenn man jetzt die Kreide wieder entzündet, brennt sie solange bis das Lampenöl verbraucht ist.

Physikalische Erklärung:

Die Funktion des Dochts basiert auf dem Prinzip der Kapillarität. Das flüssige Wachs wandert den Docht entlang nach oben und wird dann als Wachsdampf in die Flamme entlassen. Dieses Prinzip funktioniert auch mit einer Kreide, die das Lampenöl aufnimmt und dann an der Spitze in Flamme entlässt.

Bemerkung:

Durch ein gutes Zusammenspiel von Docht und Wachs erzielt man eine kontrollierte Verbrennung und eine schöne, nicht rußende Kerzenflamme.

7. Verbrennungsvorgang

Die Voraussetzungen für die Verbrennung sind das Vorhandensein von Sauerstoff, eines Brennstoffs und Hitze. Diese Parameter werden in Abb. 11 im sogenannten Verbrennungsdreieck zusammengefasst.

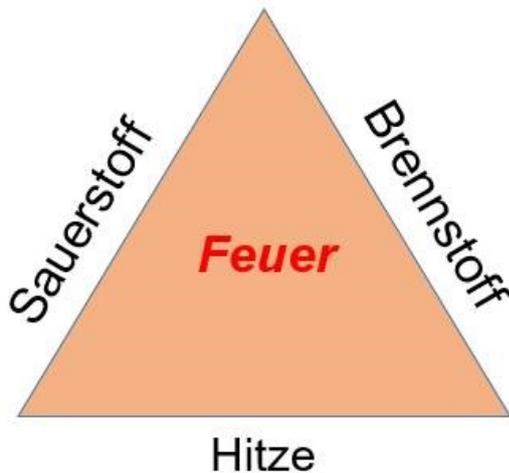


Abb. 11: Verbrennungsdreieck

Für die genauere Betrachtung der Kerzenflamme und deren Verbrennungsvorgang wird in diesem Kapitel nur von Paraffinkerzen gesprochen, da sie den größten Anteil an Kerzen ausmachen.

Wenn man flüssiges Paraffin mit einer Temperatur bis 270 °C mit einem Zündholz anzünden würde, dann würde sich das Paraffin nicht entzünden, da die Temperatur zu gering wäre. Erst ab einer Temperatur darüber kann sich das Wachs durch eine externe Flamme entzünden, was auch als Flammtemperatur bezeichnet wird. Der brennbare Stoff entwickelt gerade so viel Dampf, dass das Dampf- Luftgemisch entzündet werden kann. Wenn das Wachs erst mal entzündet ist, erwärmt sich das Wachs über die bei Verbrennung freigesetzte Reaktionswärme weiter, bis sogar oberhalb der Zündtemperatur. Die Zündtemperatur entspricht jener Temperatur, welche notwendig ist, damit sich Paraffin von alleine an der Luft entzündet. Diese liegt dabei etwa bei 320 °C. Wachs kann im festen sowie flüssigen Zustand unter normalen Umständen nicht entzündet werden, erst im gasförmigen Zustand in Verbindung mit Sauerstoff gelingt dies. Aber brennendes Wachs kann trotzdem nicht

als Kerze bezeichnet werden. Erst wenn mit Hilfe eines Dochts eine stabile Flamme gelingt, spricht man von einer Kerze. Das kapillare Verhalten des Dochts trägt dazu bei, dass das flüssige Wachs als Wachsdampf über den Docht in die Flamme entlassen wird (vgl. Luerßen, Peppler, Ries, Janek, Over, 2015, S. 364 - 365).

Schauen wir uns den Vorgang etwas genauer an. Die Verbrennung kann in verschiedene Phasen eingeteilt werden.

1. Aufschmelzen des Wachses
2. Kapillarkräfte des Dochts transportieren den Brennstoff
3. Flüssiger Brennstoff wird in die Gasphase überführt
4. Zersetzung des Brennstoffs
5. Pyrolyseprodukte werden oxidiert

Beim Anzünden der Kerze bewirkt die Flamme ein Aufschmelzen des Wachses und bei anschließender weiterer Wärmezufuhr kommt es zur Gasentwicklung des Wachses und es entsteht Wachsdampf. Dieser Dampf zersetzt sich durch Pyrolyse in festen Kohlenstoff, gasförmige Kohlenwasserstoffe und Kohlenwasserstofffragmente, wobei die festen Kohlenstoffe in dieser Zone das Glühen ausmachen. In der nächsten Zone, der Brennzone, vermischen sich der Kohlenstoff und die Gase erst mit dem Sauerstoff der Luft und wenn die Zündtemperatur erreicht wurde, wird das eigentliche Brennen eingeleitet und es entsteht Verbrennungswärme. Die Reaktion mit einem selbständigen Verbrennen beginnt, wenn die Mindestverbrennungstemperatur erreicht wird (vgl. Matthäi & Petereit, 2003, S.17).

7.1. Experiment 7: Nachweis von Wasser und Kohlenstoff



Abb. 12: Eisschicht am Schöpflöffel (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- Flüssiger Stickstoff
- Schöpflöffel
- Weißes Kunststoffstäbchen

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Es wird eine Kerze aus Paraffin angezündet und danach hält man zum einen den Schöpflöffel, gefüllt mit flüssigem Stickstoff, und zum anderen das weiße Kunststoffstäbchen über die Flamme. Der Schöpflöffel dient dem Nachweis von Wasserdampf indem er daran anfriert und sich als weiße Eisschicht manifestiert. Das weiße Kunststoffstäbchen dient dem Nachweis von Kohlenstoff, welcher sich als schwarzer Ruß bemerkbar macht.

Physikalische Erklärung:

Dass sich Wasserdampf bei der Verbrennung bildet, kann mittels anfrirenden Wassers am Schöpflöffel nachgewiesen werden. Dabei kondensiert der Wasserdampf und gefriert darauffolgend. Zur Kondensation an einer Oberfläche, in unserem Fall der Schöpflöffel, kommt es, wenn die Temperatur unterhalb des Taupunkts vom Dampf liegt (vgl. Steinhoff, S. 21). Aufgrund der extremen Kälte der Oberfläche gefriert das Kondensat sofort. Durch das Schwenken des weißen

Kunststoffstäbchens in der Flamme wird deren Temperatur verändert. Temperaturschwankungen der Kerzenflamme verursachen eine unvollständige Verbrennung und sie beginnt zu rußen und dies führt zum Anhaften des Kohlenstoffs in Form von Ruß am Stäbchen.



Abb. 13: Ruß am Stäbchen

Bemerkung:

Flüssiger Stickstoff hat den Nachteil, dass er nicht sehr einfach zu bekommen ist und es zudem oft passiert, dass man die Kerzenflamme durch Verschütten auslöscht. Als Alternative zum flüssigen Stickstoff kann auch ein Schöpflöffel voll mit Eis verwendet werden.

7.2. Experiment 8: Vier Aggregatzustände der Kerze:

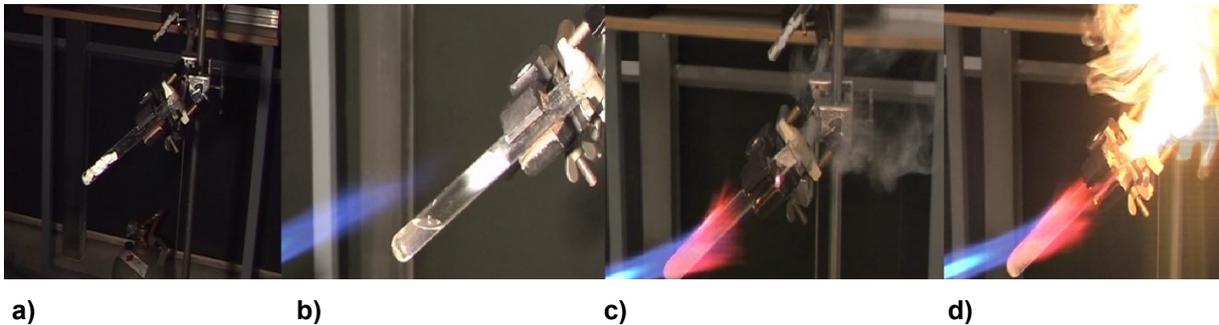


Abb. 14 a, b, c, d: Die verschiedenen Aggregatzustände inklusive blauer Flamme (Bunsenbrenner) a) Fest b) Flüssig c) Gasförmig d) Plasma (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Eprovette
- Stativmaterial
- Paraffinstückchen
- Bunsenbrenner

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die Eprovette wird am Stativ fixiert, sodass die Öffnung, wie abgebildet, leicht schräg nach oben zeigt. Anschließend gibt man die Paraffinstückchen in die Eprovette und erhitzt diese mit dem Bunsenbrenner. Dabei beobachtet man, dass das feste Paraffin nach kurzer Zeit schmilzt. Erhitzt man es weiter, so beginnt es zu sieden und zu dampfen. Hält man nun die Flamme des Bunsenbrenners kurz in den Wachsdampf, so entzündet sich dieser.

Physikalische Erklärung:

Aus Kapitel 6.1 entnehmen wir, dass Paraffin eine Schmelztemperatur zwischen 45 – 60 °C hat. Aufgrund der sehr heißen Flamme des Bunsenbrenners ist diese schnell erreicht. Darauf folgend beginnt das Paraffin zu sieden und anschließend zu verdampfen. Da gasförmiges Paraffin eine Zündtemperatur von etwa 320 °C (Kapitel 6.6) hat, entzündet sich der Wachsdampf schlagartig, sobald er mit der Flamme des Bunsenbrenners in Berührung kommt. Das Resultat ist eine Flamme, welche Eigenschaften von Plasma aufweist.

Bemerkung:

Generell kommen Stoffe in drei Aggregatzuständen vor: fest, flüssig oder gasförmig. Dabei reiht man diese vom niedrigen festen, über flüssigen, bis hin zum höheren gasförmigen Zustand. Um höhere Aggregatzustände zu erreichen muss dem Stoff Energie zugeführt werden. Umgekehrt wird dabei Energie abgegeben (vgl. Kuchling, 2014, S. 269). Wie bereits aus Kapitel 7 hervorgeht, herrschen bei einer brennenden Kerze diese drei Aggregatzustände zugleich. Sie ergeben sich durch die unterschiedlichen Temperaturen und lassen sich gut beobachten. Dabei besteht der relativ kühle Kerzenstumpf aus festem Wachs, welches durch die Hitze der Kerze aufschmilzt und sich in der Brennschüssel verflüssigt. Des Weiteren ist der gasförmige Zustand in der Flamme selbst zu finden. Der eigentlich vierte Aggregatzustand äußert sich dabei anhand der Flamme. Diese hat auch Eigenschaften eines Plasmas, wobei hier nur eine schwache Ionisierung auftritt (Experiment 36). Bei der Durchführung dieses Versuches ist äußerste Vorsicht geboten. Beim Entzünden des Wachsdampfes kann es zu heftigen Stichflammen kommen. Sollte es zu einem unkontrollierten Verbrennen kommen, muss die Flamme durch Ersticken gelöscht werden, nicht etwa durch Löschen mit Wasser.

Sicherheitshinweis:

Dieses Experiment sollte ausschließlich von erfahrenen Fachkräften durchgeführt werden. Wichtig ist das Tragen geeigneter Schutzausrüstung, welche zumindest eine Schutzbrille und feuerfeste Handschuhe beinhaltet.

7.3. Experiment 9: Fettbrand mit Paraffin

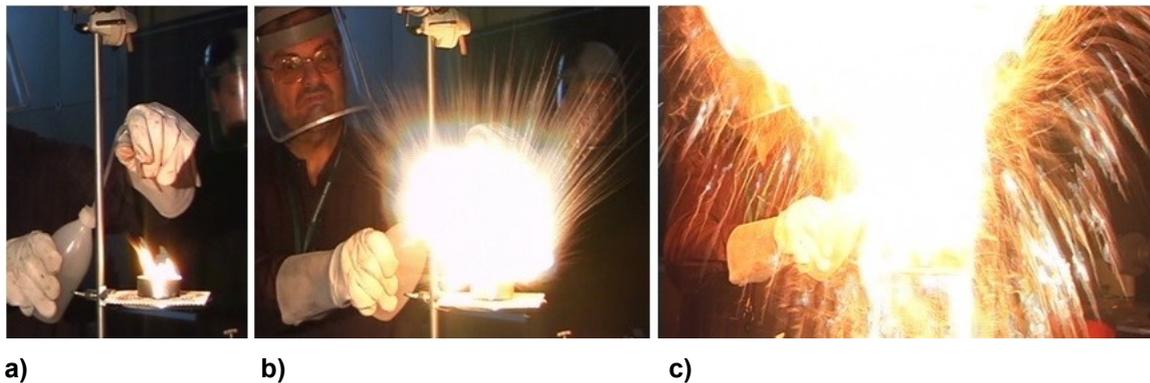


Abb. 15 a, b, c: Fettbrand a) Brennendes Paraffin b) Stichflamme nach Löschung mit Wasser c) Flammenwolke (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze (1/4 - 1/8 Stück Teelicht ohne Docht)
- Bunsenbrenner
- Stativ (mit Gitter als Standplatz für die Kerze)
- Spritzflasche (mit Wasser)
- Feuerfeste Handschuhe

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Bei diesen Experiment soll gezeigt werden, was passieren würde, wenn man einen Öl oder Fettbrand mit Wasser löschen würde. Der in diesem Experiment verwendete Brennstoff ist ein Teelicht aus Paraffin. Es sollte genügend Platz vorhanden sein, in der Umgebung dürfen keine brennbaren Materialien liegen und es müssen feuerfeste Handschuhe, sowie ein Gesichtschutz getragen werden. Das Teelicht wird auf das Gitter, welches am Stativ befestigt wird, gestellt und von unten mit dem Bunsenbrenner beheizt. Dies wird so lange gemacht bis die Zündtemperatur von 320 °C erreicht wird, sich das Wachs entzündet hat und von selber weiter brennt. Jetzt wird mit der Spritzflasche das Wasser auf das Teelicht gespritzt. Aber Vorsicht, es wird eine große Feuerwolke geben.

Physikalische Erklärung:

Wenn man mit einer Spritzflasche oder einem anderen Ausgießer Wasser auf ein brennendes Öl oder wie bei diesem Experiment auf das flüssige Paraffin spritzt, so verdampft das auftretende Wasser im flüssigen Paraffin schlagartig und reißt

Tröpfchen des Paraffins mit sich. Durch Verdampfung des Wassers kommt es zu einer enormen Volumsvergrößerung und die mitgerissenen Tröpfchen entzünden sich über der Flamme und eine Feuerwolke entsteht.

Sicherheitshinweis:

Brände wie diese darf man auf keinen Fall mit Wasser löschen, sondern man muss sie ersticken und einen Deckel oder ein Geschirrtuch darüber werfen. Die Flamme geht aus, da mit dem Tuch oder dem Deckel die Sauerstoffzufuhr unterbrochen wird und diese dann erstickt. Bei diesem Experiment kann man die Flamme mit dem feuerfesten Handschuh ersticken wie hier in Abb.16 dargestellt.



Abb. 16: Flamme ersticken

8. Flammenzonen

Im Kapitel 7 wurde schon über bestimmte Zonen in der Flamme gesprochen, aber es gibt noch andere Zonen in der Flamme, die beschrieben werden müssen.

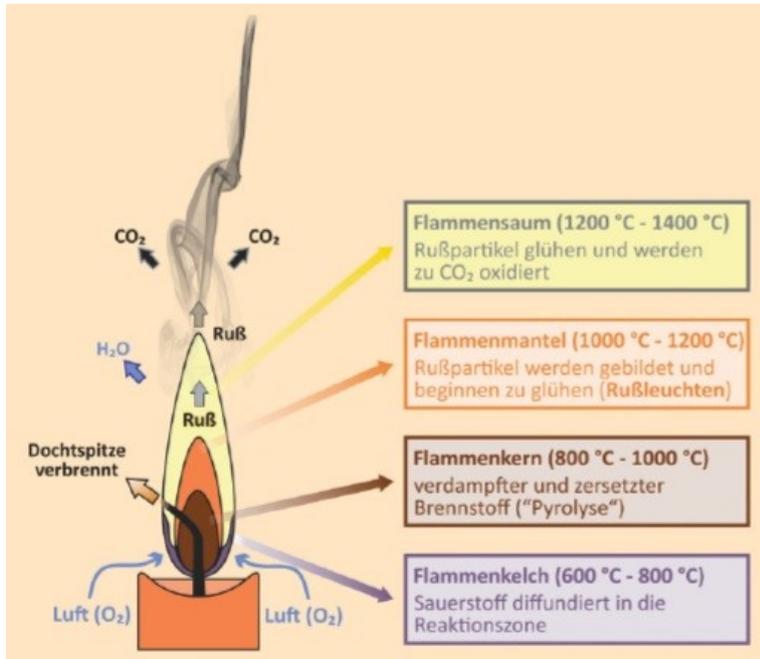


Abb. 17: Die Vier Flammenzonen
(Matthäi & Petereit, 2003, S. 18)

1. Zone (blauer Flammenkelch)

Es herrscht eine Temperatur von 600 - 800 °C. Die erste Zone bildet den unteren Teil der Flamme, wo ein O₂ Überschuss besteht, und hat eine Form wie ein Kelch der bläulich leuchtet. Hier wird ein Teil des Brennstoffes vollständig zu H₂O und CO₂ verbrannt, ohne Entstehung von C-Partikel. Die Wärme, die hier entsteht, bewirkt ein Abschmelzen des Brennstoffes und je nachdem wie niedrig der Schmelzpunkt des Brennstoffes ist, entsteht eine größere oder kleinere Brennschüssel (vgl. Matthäi & Petereit, 2003, S. 18).

2. Zone (dunkler Flammenkern)

Diese Zone ist direkt oberhalb des Dochts, an der es einen O₂ Mangel gibt und Temperaturen im Bereich von 600 °C direkt am Docht sowie 1000 °C in der oberen Hälfte herrschen. Dies wird als dunkle Zone bezeichnet, weil der Brennstoff, der direkt aus dem Docht heraus verbrennt und verdampft, dunkel ist. Infolge des O₂

Mangels beginnt in der oberen Hälfte die Pyrolyse des Brennstoffes, wobei kleinste C-Partikel entstehen (vgl. Matthäi & Petereit, 2003, S. 18).

3. Zone (leuchtender Flammenmantel)

Hier gibt es Temperaturen bis 1200 °C und die Form entspricht ungefähr der eines hell leuchtenden Kegels. Durch den immer noch vorhandenen O₂ Mangel setzt sich die Pyrolyse fort und größere C-Partikel entstehen, deren Glühen das Leuchten der Flamme bewirkt (vgl. Matthäi & Petereit, 2003, S. 18).

4. Zone (leuchtender Flammensaum)

Der Flammensaum ist die heißeste Zone mit Temperaturen bis 1400 °C. Die Rußteilchen oxidieren hier zu CO₂ und je kleiner diese sind desto schneller und vollständiger verbrennen sie (vgl. Luerßen, Peppler, Ries, Janek, Over, 2015, S. 365).

8.1. Experiment 10: Dampf mit Rohr in Gefäß einleiten. Brennprodukt aus der Mitte der Kerzenflamme

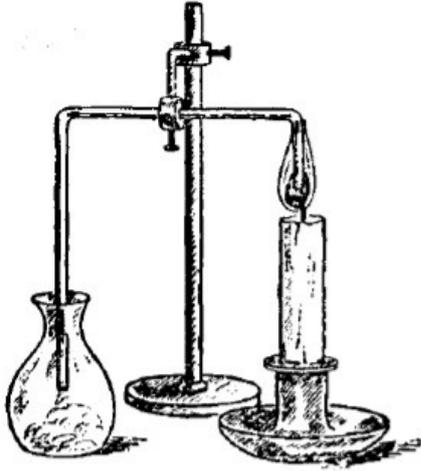


Abb. 18: Wachsdampf in Gefäß einleiten (Faraday, 1980, S. 55)

Material:

- Kerze
- Glasröhrchen
- Glasflasche mit Stopfen
- Stativ

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Wie in Abb. 18 ersichtlich wird am Stativ ein gewinkeltes Glasröhrchen befestigt. Dabei ragt das eine Ende in die Mitte der Kerzenflamme und das andere Ende führt mittels Stopfen in die Glasflasche. Es ist zu beobachten, dass von der Kerzenflamme durch das Glasröhrchen ein dampfartiges Gemisch in die Flasche austritt. Während das Gemisch kontinuierlich weiter entweicht, sammelt sich nach kurzer Zeit bereits eine Substanz am Boden. Dabei handelt es sich um Wachs.

Physikalische Erklärung:

Grundvoraussetzung für das Gelingen dieses Experiments ist die Lage des Glasröhrchens in der Flamme. Dabei ist darauf zu achten, dass sich diese knapp oberhalb des Dochts befindet. Das dampfartige Wachs strömt dabei unverbrannt

durch das Glasröhrchen in Richtung der Flasche, wo es anschließend sublimiert. Wie in Kapitel 8 erwähnt kommt es in dieser Zone der Flamme zu einer teilweisen Verbrennung des Wachses. Jener nicht verbrannte Teil strömt dabei gasförmig in das Röhrchen.

Bemerkung:

Um zu zeigen, dass es sich bei der gewonnenen Substanz wirklich um brennbares Wachs handelt, werden hier Demonstrationsexperimente angeführt.

- 1) Nachdem die Kerze ausreichend lange gebrannt hat und sich eine größere Menge Wachsdampf sowie festes Wachs in der Flasche angesammelt haben, entfernt man das Wachs und bringt dies durch Wärmezufuhr, beispielsweise mittels eines Bunsenbrenners, erneut zum Schmelzen. Es wird solange Hitze zugeführt, bis die Brennmasse stark zu dampfen beginnt. Anschließend führt man einen brennenden Span an den Flaschenhals heran und man stellt fest, der Dampf brennt.
- 2) Um sich den Schritt des Auffangens in einer Flasche zu ersparen, bedient man sich nur einem Glasröhrchen, hält es in die Mitte der Flamme und wartet bis der Dampf austritt. Auch hier kann ein brennender Span herangeführt werden und am Ende des Röhrchens lodert eine kleine Flamme.

Beide Demonstrationsexperimente sollen beweisen, dass es sich bei dem Verbrennungsprodukt im dunklen Flammenkern wirklich um brennbaren Wachsdampf handelt (vgl. Faraday, 1980 S. 54 - 58).

8.2. Experiment 11: Ruß leuchtet



Abb. 19: Brennende Holzkohle

Material:

- Bunsenbrenner
- Holzkohlestaub

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Man entzündet die Flamme des Bunsenbrenners. Diese leuchtet eher bläulich. Streut man ein wenig Holzkohlenstaub in die Flamme, so leuchtet dieser in einem rötlichen Ton auf.

Physikalische Erklärung:

Wie aus den Kapiteln 7 / 8 hervorgeht, ist eine blaue Flamme, wie die eines Bunsenbrenners, ein Zeichen dafür, dass viel Sauerstoff verbrannt wird. Holzkohlestaub besteht zum Großteil aus Kohlenstoff. Betrachtet man ein Partikel, so kann man dieses in guter Näherung als Plank'schen Strahler annehmen. Seine Eigenschaft besteht darin elektromagnetische Strahlung zu emittieren. Die Schwarzkörperstrahlung hängt dabei stark mit der Temperatur zusammen.

Die spektrale Intensitätsverteilung wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz definiert.

$$I_{\lambda,S} = \frac{a_1}{\lambda^5 e^{\frac{a_2}{\lambda T}} - 1} \quad (8.1)$$

$a_1 = 2 \cdot h \cdot c_v^2$
 $a_2 = h \cdot c_v / k$
 c_v ... Vakuumlichtgeschwindigkeit
 h ... Planck'sches Wirkungsquantum
 k ... Boltzmann Konstante ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J / K)
 λ ... Wellenlänge
 T ... Temperatur

Erst bei hohen Temperaturen, wie sie in der Flamme des Bunsenbrenners herrschen, emittieren die Holzkohlepartikel Wärmestrahlung im sichtbaren Spektralbereich. Darum kommt es zu einer rötlich, gelben Färbung der Flamme. Maxima der Strahlungsintensitäten verschieben sich mit zunehmender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen hin.

Bemerkung:

Die Kohlenstoffatome in der Kerze verhalten sich bei der Verbrennung adäquat.

9. Die Form der Kerzenflamme

Die typische Mandelform der Kerze bekommt diese hauptsächlich durch die aufsteigende Konvektion der Luft. Dieser Vorgang ist gut in Experiment 12 dargestellt. Ein anderer Zugang, um dies nachzuweisen wäre das umgekehrte Experiment und die Konvektion einfach auszuschalten. Dies wird im Experiment 13 durchgeführt und genauer beschrieben. Des Weiteren kann man mit einem Experiment zeigen, dass die Flamme physikalisch im Inneren ein Plasma darstellt, also ein ionisiertes Gas. Dargestellt wird dies in Kapitel 16 (Experiment 51 / 52).



Abb. 20: Mandelform der Flamme (pixabay)

9.1. Experiment 12: Konvektion über Kerzenflamme mit Wärmebildkamera zeigen



Abb. 21: Aufnahme Wärmebildkamera (FLIR T360)

Material:

- Kerze
- Wärmebildkamera

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die Kerze wird auf einem sicheren Untergrund gestellt und angezündet. Weiter ist es von Vorteil, wenn der Hintergrund in etwa die gleiche Temperatur aufweist, um ein besseres Bild mit der Wärmebildkamera zu bekommen. Nun betrachtet man die Flamme mit der Wärmebildkamera und man kann wie in Abb. 21 sehen, dass über der Flamme eine höhere Temperatur herrscht, wobei es unter der Flamme relativ schnell kühl wird. Dieser Vorgang wird durch Konvektion hervorgerufen.

Physikalische Erklärung:

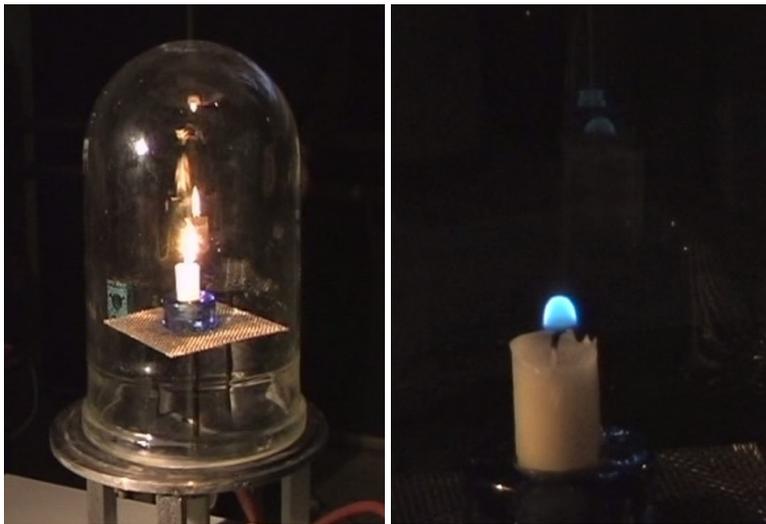
Wenn die Kerze brennt, erwärmt sie die Umgebungsluft, welche sich ausdehnt und somit eine geringere Dichte als die kühlere Luft aufweist und deshalb aufsteigt. Durch diesen Vorgang muss von unten Umgebungsluft nachkommen, weil in diesem Bereich ein Unterdruck durch die aufströmenden Gase entsteht (vgl. Tipler, Mosca,

Wagner, 2015, S. 638). Wenn wir diesen Vorgang jetzt durch eine Wärmebildkamera betrachten, kann man sehen, dass unter der Flamme die kühlere Umgebungsluft zur Flamme kommt und oberhalb der Flamme die wärmeren Verbrennungsgase vorherrschen. Dieser Vorgang wird Konvektion genannt.

Bemerkung:

Jeder Körper, der eine Temperatur über den absoluten Nullpunkt (-273 °C) besitzt, strahlt elektromagnetische Wellen aus. Wärmestrahlung, die im Wellenlängenbereich von 800 nm bis 20 µm liegt, kann mit einer Wärmebildkamera aufgenommen werden. Bei Detektoren, wie dem Bolometer oder auch dem Thermoelement, wird die Strahlung in Wärme umgewandelt und im Wellenlängenbereich oberhalb von 7 µm gemessen (vgl. Grötzebauch, Hahn, Nordmeier, 2009, S. 1 - 2).

9.2. Experiment 13: Die Weltraumkerze



a)

b)

**Abb. 22 a, b: Kerze in Rezipient a) Vor Absaugen der Luft
b) Im Vakuum (Weihnachtsvorlesung 2012)**

Material:

- Kerze
- Rezipient
- Vakuumpumpe

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Eine Kerze wird in einem Rezipienten aufgestellt und angezündet. Dieser Rezipient ist ein Gefäß, in dem man durch Abpumpen der Luft im Inneren ein Vakuum erzeugen kann. In diesem Fall wird eine Glaskuppel darübergestülpt und mittels einer Drehschieberpumpe die Luft im Inneren herausgesogen. Nach Wegnahme der Luft leuchtet die Flamme nur mehr bläulich bis sie schließlich ganz erlischt.

Physikalische Erklärung:

Dadurch, dass kein Sauerstoff mehr nachkommt, kann irgendwann nur noch über Diffusion Sauerstoff transportiert werden und die Kerze brennt deshalb viel kraftloser und in bläulicher Farbe. Die bläuliche Farbe entsteht deshalb, weil sich durch die niedrigen Temperaturen kein Ruß bilden kann und somit das gelbliche Leuchten wegfällt (Kapitel 8).

Bemerkung:

Wenn wir die Gravitation wie im Weltall auch noch wegnehmen würden, würde die Flamme ihre Mandelform wegen der fehlenden Konvektion verlieren und zu einer bläulichen Halbkugel werden (Abb. 23).

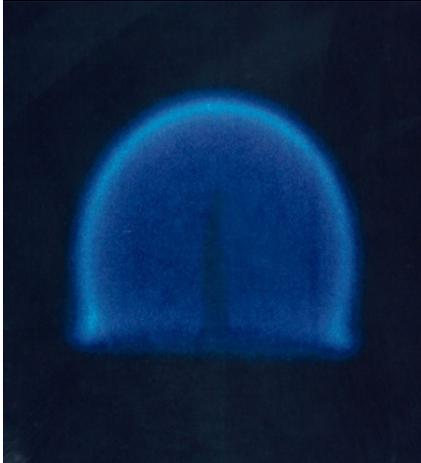


Abb. 23: Weltraumkerze
(<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Candlespace.jpg>)

10. Das Licht einer Kerze

Um das Leuchten einer Kerze noch besser verstehen zu können, muss man das Licht einer Kerze genauer betrachten. Dazu kann man sich mit einem ganz einfachen Experiment weiterhelfen und die einzelnen Farben einer Flamme beobachten. Dies ist in Experiment 14 beschrieben.

Aus diesem Experiment kann man schließen, dass die Flamme einer Kerze aus verschiedenen Farben besteht, mit einem Hauptanteil an rotem Licht und etwas weniger grünem und blauem Licht. Dies ist ein sehr einfacher Versuch, den jeder Zuhause nachmachen kann und immer in etwa auf das gleiche Ergebnis kommen wird. Wenn man das Licht mit einem modernen Spektrometer anschaut (Abb. 24), indem man es in der Nähe des Flammenkelches eingesammelt hat, dann kann man deutlich ein kontinuierliches Spektrum, von 360 nm bis 760 nm, ausmachen. Außerdem dient es zur Darstellung der kontinuierlich steigenden Schwarzkörperstrahlung des Rußleuchtens.

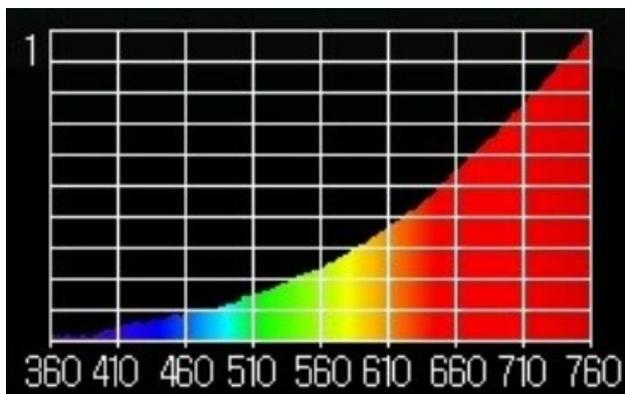


Abb. 24: Spektrum Kerzenlicht (UPRtek MK350N)

Die Schwarzkörperstrahlung hängt sehr stark mit der Temperatur des Körpers zusammen, was gut in Abb. 25 zu erkennen ist, wo der theoretische Verlauf der Schwarzkörperstrahlung in Vergleich zu einer 100 W Glühlampe aufgetragen ist. Man kann sehen, dass die Glühlampe eine weitaus größere Lichtstärke im sichtbaren Bereich besitzt als eine Kerze, wo der größte Anteil der Strahlung im infraroten Bereich liegt. Die Lichtausbeute liegt bei einer Glühlampe bei etwa 5 % was zwar nicht viel, aber immer noch mehr als die einer Kerze, die bei etwa 0,4 % liegt, ist. Neuere Leuchtmittel, wie die Energiesparlampe oder Leuchtstoffröhre, schaffen eine

Lichtausbeute von 50 – 60 % (vgl. Luerßen, Peppler, Ries, Janek, Over, 2015, S. 367).

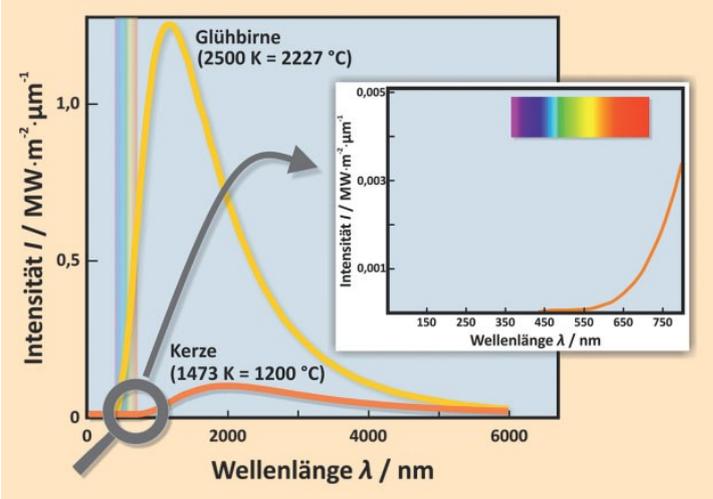


Abb. 25: Die Schwarzkörperstrahlung
(Luerßen, Peppler, Ries, Janek, Over, 2015, S. 368)

10.1. Experiment 14: CD-Spektroskopie



Abb. 26: Spektrum einer Kerze auf einer CD

Material:

- Kerze
- CD

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Dieses Experiment sollte in einem komplett abgedunkelten Raum stattfinden, da sonst das Licht in der Umgebung einen Einfluss auf das Experiment hat. Um das Spektrum einer Kerze darzustellen, sind nur eine CD und eine Kerze notwendig. Die Kerze wird in einem abgedunkelten Raum angezündet und dahinter die CD so gehalten, dass man ein schönes Spektrum der Kerze erkennen kann.

Physikalische Erklärung:

Erklärt kann dies werden, indem wir uns die CD etwas genauer anschauen. Zum Messen von Wellenlängen dienen Beugungsgitter und ein solches Gitter befindet sich unter anderem auch auf einer CD. Zur Speicherung werden an der Oberfläche der CD dicht beieinander liegende Rillen eingeritzt. So entstehen Furchen und Stege, die das Licht reflektieren und Reflexionsgitter genannt werden. Die Farben der Kerze werden unterschiedlich gebeugt und reflektiert, was zur Folge hat, dass das Spektrum der Kerze auf der CD zu sehen ist (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2015, S. 1093 - 1094).

Bemerkung:

Auch bei der CD kann gut beobachtet werden, dass der rote Anteil der Farbe überwiegt und nur ein kleiner Teil als grün und blau zu erkennen ist.

11. Experimente zur Kerze

11.1. Experiment 15: Das Prinzip der Davy'schen Sicherheitslampe



Abb. 27: Zweite Flamme brennt
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Feinmaschiges Metallgitter
- Kerze
- Feuerzeug

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Man zündet die Kerze an und hält danach das Metallgitter in die Flamme. Es wird schwarzer Ruß sichtbar, welcher sich nach kurzer Zeit in weißen Paraffindampf färbt. Dieser weiße Dampf kann mit Hilfe eines Feuerzeugs angezündet werden. Nun erscheint eine zweite Flamme oberhalb des Gitters. Es wird das Prinzip einer Davy'schen Sicherheitslampe veranschaulicht.

Physikalische Erklärung:

Das Grundprinzip der Davy'schen Sicherheitslampen oder anderer ähnlicher Sicherheitslampen beruht darauf, dass die Flamme eines brennbaren Gasgemisches nicht durch die Öffnungen eines engmaschigen Metallgitters hindurchgeht, solange dieses nicht zu glühen beginnt. Bringt man Lampen mit solchen Apparaturen in Gegenden explosiver Gase, so findet meist nur eine kleine Verpuffung statt. Die

physikalische Sicherung vor einer Explosion besteht darin, dass die gute Wärmeleitfähigkeit des metallischen Gitters, die Temperatur des Gasgemisches schnell unter die Zündtemperatur bringt.

Bemerkung:

Die englische Wissenschaftler Sir Humphry Davy revolutionierte zu Beginn des 19ten Jahrhunderts die Sicherheitslage in den Gruben des Kohlebergbaus. Als junger Professor erkannte er schon bald die Wichtigkeit der Entschärfung des Grubengases aufgrund einiger fürchterlichen Unglücke mit zahllosen Toten. Er machte sich die in den vorherigen Zeilen genannten Prinzipien zu Nutzen und entwickelte die „Davy’sche Sicherheitslampe“. Die in Abb. 28a gezeigte zweite Version der Lampe hatte einen kleinen Ringkühler aus konzentrischen, senkrechten Blechen. Die Breite der Ringspalten betrug etwa 1 mm, die Höhe der Kühlringe etwa 40 mm. Die ein- und ausströmende Luft wird dabei durch diese Apparatur geleitet. Die neue Erfindung hatte jedoch eine relativ schwache Leuchtkraft zum Nachteil. Davy behalf sich in weiterer Folge mit dem Schornsteinprinzip in einem Glaszylinder (Abb. 28b), wo die Zu- beziehungsweise Abluft durch Lochbleche geleitet wurde (vgl. Repetzki, S. 48 - 52).

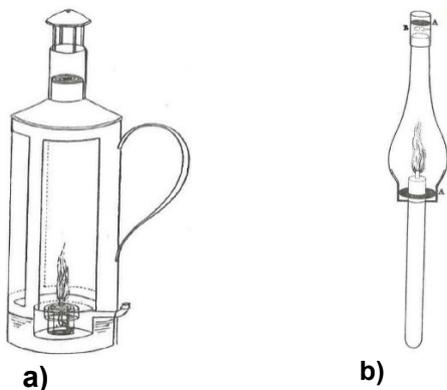
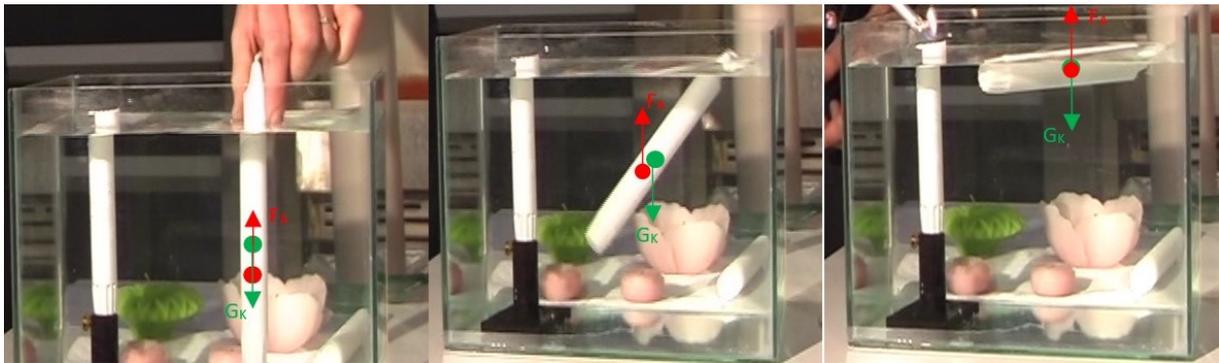


Abb. 28a,b: Grubenlampe. a) Zweite Version der Davy’schen Sicherheitslampe, b) Weiterentwicklung mit Glaszylinder und Kerze (Repetzki, 1973, S. 48 - 51)

11.2. Experiment 16: Schwimmelage einer Kerze



a)

b)

c)

Abb. 29 a, b, c: Schwimmende Kerze a) Labiles Gleichgewicht b) Übergangsphase c) Stabiles Gleichgewicht (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- Transparentes Gefäß (gefüllt mit Wasser)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zunächst wird das Gefäß mit Wasser gefüllt und die Kerze waagrecht auf die Wasseroberfläche gelegt. Man kann beobachten, dass sie schwimmt. Nun taucht man die Kerze senkrecht ins Wasser und lässt diese los. Dabei ist zu beobachten, dass sich die Kerze schon nach kurzer Zeit in die waagrechte Position begibt und schwimmt.

Physikalische Erklärung:

Taucht man einen Körper in eine Flüssigkeit, so verliert dieser scheinbar einen Teil seiner Gewichtskraft. Dafür verantwortlich ist die der Gewichtskraft entgegengesetzte Kraft, die Auftriebskraft.

„Beim Eintauchen in eine Flüssigkeit erfährt jeder Körper eine nach oben gerichtete Auftriebskraft. Diese ist dem Betrag nach gleich der Gewichtskraft der vom Körper verdrängten Flüssigkeit.“ (Kuchling, 2014, S. 154)

In diesem Fall ist die Auftriebskraft bei vollständigem Eintauchen der Kerze größer als die Gewichtskraft. Darum schwimmt die Kerze.

Um zu erklären warum diese waagrecht schwimmt, muss man dabei die Kraftwirkung auf die Schwerpunkte der Kerze und der verdrängten Flüssigkeit genauer

betrachten. Die Gewichtskraft G_K greift dabei am Schwerpunkt S_K des Körpers an, die Auftriebskraft F_A dabei am Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit S_F . Beide Kräfte sind entgegengerichtet und erzeugen bei Auslenkung aus der Ruhelage ein rücktreibendes Drehmoment, welches den Körper in ein stabiles Gleichgewicht zurückbringt. Den Zustand des instabilen oder labilen Gleichgewichts verdeutlicht uns das senkrechte Eintauchen der Kerze. Dabei bringen kleinste Störungen die schwimmende Kerze aus dem labilen Gleichgewicht, sodass diese folglich in eine horizontale, stabile Schwimmlage übergeht. Die Störungen treten hierbei in Form von Strömungen des Wassers auf. Die in Abb. 29 a, b, c eingezeichneten Vektoren sind dabei nicht maßstabsgetreu eingezeichnet.

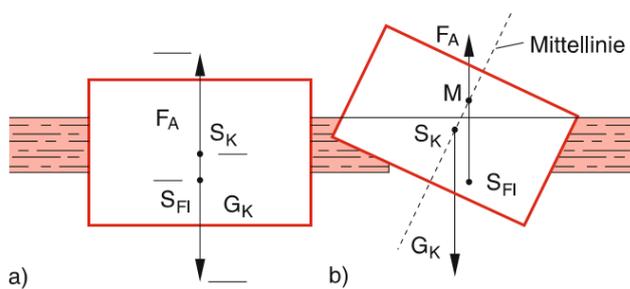


Abb. 30 a, b: Stabilität eines schwimmenden Körpers a) Gleichgewichtslage b) Verkippung mit auftretenden Momenten (Demtröder, 2008, S. 184)

Bemerkung:

Das Verhalten von schwimmenden Körpern hat vor allem im Schiffsbau große Bedeutung. Um Schiffe vor dem Kentern zu bewahren, muss ein ausreichend aufrichtendes Moment vorhanden sein, welches der Auslenkung, bedingt durch Wind (Segelschiffen) und Wellen, entgegenwirkt. Erreichen kann man dies durch das Tieferlegen des Schwerpunkts S_K , beispielsweise durch Anbringen eines tiefen, schweren Kiels (vgl. Demtröder, 2008, S. 184).

11.3. Experiment 17: Kerze unter Wasser



Abb. 31: Kerze unter Wasser
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- Kerzenhalter
- Transparentes Gefäß (gefüllt mit Wasser)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Der Kerzenhalter wird an die Kerze angebracht und anschließend so im Wasser versenkt, dass nur noch ein kleines Stück der Kerzenspitze samt Docht aus dem Wasser ragt. Nun entzündet man die Kerze und man kann beobachten, dass die Kerzenflamme in das Innere der Kerze wandert und eine Art Schacht in die Kerze schmilzt. Erst nach einiger Zeit erlischt die Flamme.

Physikalische Erklärung:

Würde man die Kerze nicht mit dem Kerzenhalter beschweren, würde diese aufgrund des geringeren spezifischeren Gewichts auf der Wasseroberfläche schwimmen. Nach dem Entzünden beginnt der herkömmliche Brennvorgang der Kerze. Der Schacht entsteht aufgrund der Kühlung des Waxes durch das Wasser, was ein Schmelzen, der weit vom Docht entfernten Regionen, verhindert. So kommt es, dass eine äußere Schicht erhalten bleibt. Nach einiger Zeit erlischt die Kerze. Dies lässt auf einen Sauerstoffmangel zurückführen. Eine mögliche Erklärung wäre, dass das bei der Verbrennung erzeugte Kohlendioxid schwerer als Luft ist und sich im Schacht der Kerze sammelt, was das Auslöschten der Kerzenflamme nach sich zieht.

Bemerkung:

In Abb. 32 ist eine herkömmliche Schwimmkerze dargestellt. Sie funktioniert nach demselben Prinzip. Das Kippen der Kerze wird durch den engen Glaszylinder verhindert und ein kleiner Teil der Spitze ragt dabei aus dem Wasser. Beim Brennvorgang selbst kommt es zu einer Verkürzung des Kerzenstrangs und einer daraus resultierenden Gewichtsabnahme der Kerze. Die Verkürzung des Strangs und die Verminderung des Gewichts von Kerze und verdrängtem Wasser laufen proportional zueinander ab, was dazu führt, dass kein Wasser einbrechen kann. Auch hier erfolgt nach einiger Zeit das Erlöschen der Flamme aufgrund der Unterbrechung der Brennmassenzufuhr. Schwimmkerzen gelten als äußerst handhabungssicher aufgrund ihres abrupten Erlöschens. Möchte man das Prinzip der schwimmenden Kerze in beliebigen Gefäßen anwenden, so eignen sich dafür am besten Teelichter, da sie aufgrund ihrer Form sehr stabil auf der Wasseroberfläche schwimmen (vgl. Schlichting, 1994).

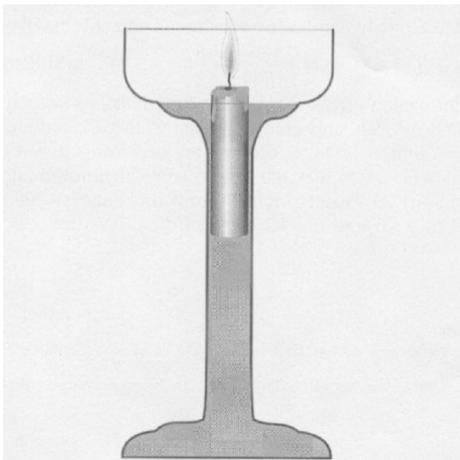


Abb. 32: Herkömmliche Schwimmkerze (Schlichting, 1994, S. 1)

11.4. Experiment 18: Diffusion roter Farbe



Abb. 33: Diffusionsvorgang in Festkörpern (Paraffin)
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Rote Kerze
- Weißer Paraffinblock

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Der Versuchsaufbau gestaltet sich als äußerst simpel. Es werden lediglich die rote Kerze und der Paraffinblock nebeneinander gestellt. Zu beachten ist dabei, dass sich die beiden Festkörper berühren. Nach einigen Monaten kann man feststellen, dass die rote Farbe in den weißen Paraffinblock übergeht.

Physikalische Erklärung:

Der hier entstandene Effekt beruht auf dem Prinzip der sogenannten Diffusion. „Unter Diffusion versteht man das selbsttätige Vermischen der Moleküle als Folge ihrer thermischen Bewegung.“ (Kuchling, 2014, S. 181) Als Grundlage dafür gilt die Molekularbewegung, welche sowohl in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen herrscht. Aufgrund der geringen Beweglichkeit von Festkörpermolekülen, verläuft diese bei Festkörpern am langsamsten, bei Gasen hingegen am schnellsten. Außerdem ist die Diffusion in allen Aggregatzuständen stark temperaturabhängig. Der Forscher Robert Brown, Namensgeber der Brown'schen Bewegung, stellte diese regellose Zickzackbewegung erstmals auch bei anorganischen Stoffen wie Ruß oder Farbstoffen fest.

Bemerkung:

Ein Diffusionsvorgang in einem Festkörper kann mitunter sehr lange dauern. Die in diesem Versuch verwendeten Materialien entstammen aus dem Fundus von Herrn Prof. Pottlacher. Sie lagen jahrelang zusammen in einer Kiste. Das Experiment dient demnach nur als Veranschaulichung eines physikalischen Phänomens und lässt sich nicht in kurzer Zeit reproduzieren.

11.5. Experiment 19: Wasserkochen in Papiergefäß



Abb. 34: Selbstgebauter Wasserkocher

Material:

- Kerze
- Zündholzschachtel aus Karton / Papier
- Auflage für Schachtel
- Klebeband

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zuerst wird die Schachtel an den Ecken mit Klebeband verstärkt, weil, wenn die Schachtel mit Wasser gefüllt wird, die Ecken aufbrechen könnten. Danach wird sie mit Wasser gefüllt und so auf eine Auflage gelegt, dass darunter die Kerze mit der Flamme Platz findet. Die Kerze wird unter der Schachtel angezündet und man wartet bis das Wasser zu kochen beginnt. Die Schachtel wird nicht zu brennen beginnen.

Physikalische Erklärung:

Das Wasser kühlt die Unterseite der Schachtel so stark, dass die Schachtel nie die Zündtemperatur erreicht, die bei Papier, je nachdem welches man nimmt, zwischen 165 – 360 °C liegt (vgl. Hageböling, Halbe, Kirchoff, Lieber, Siepelmeyer-Kierdorf, 1999, S. 30). Da das Wasser bei atmosphärischem Druck auf Meereshöhe bei 100 °C siedet, kann das Wasser gekocht werden ohne dass in die Schachtel ein Loch hinein gebrannt wird.

Bemerkung:

Dieses Experiment kann auch mit einer selber gebastelten Papiertüte durchgeführt werden. Zur Herstellung dieser, findet man im Internet genügend Anleitungen.

11.6. Experiment 20: Ballon und Kerze



Abb. 35: Ballon unter Flamme
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- 2 Ballons
- Kerze
- Wasser

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zuerst bläst man den Luftballon auf und verschließt ihn. Man zündet nun eine Kerze an und hält den Luftballon über die Kerze. Kaum hält man ihn, sogar noch relativ weit über die Kerzenflamme, platzt er. Der zweite Ballon wird anfangs mit einer kleinen Menge Wasser gefüllt, anschließend aufgeblasen und verschlossen. Man hält diesen wieder über die Kerzenflamme und der Ballon bleibt unversehrt. Selbst wenn man ihn direkt ans heiße Innere der Kerze heranhält, zerplatzt er nicht.

Physikalische Erklärung:

Das physikalische Prinzip, welchem dieses Phänomen zugrunde liegt, nennt sich Wärmeleitung (bei Festkörpern) oder Wärmeströmung (bei Flüssigkeiten und Gasen), welche von der Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$] abhängt. Es wird zunächst der Ballon ohne Wasser betrachtet. Trifft die Flamme auf die Ballonhaut, so wird diese heiß, bis sie eine kritische Temperatur erreicht und reißt. Dies geschieht äußerst rasch, da die im Ballon befindliche Luft ein äußerst schlechter Wärmeleiter ist und eine dementsprechend kleine Wärmeleitfähigkeit besitzt. Beim mit Wasser gefüllten Ballon hingegen, wird die zugeführte Wärmeenergie schnell abgeleitet,

sodass die kritische Temperatur der Ballonhaut nicht erreicht wird. Die Werte der Wärmeleitfähigkeit bei einer Raumtemperatur von 20 °C betragen für Wasser $0,60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ und für Luft $0,026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ (vgl. Kuchling, 2014, S. 644). Generell ist die Wärmeübertragung in Gasen schlechter als in Flüssigkeiten. Grund dafür ist die viel geringere Teilchendichte bei Gasen gegenüber Flüssigkeiten, da Wärmeleitung über Teilchentransport erfolgt (vgl. Demtröder, 2008, S. 303 - 304).

Bemerkung:

Die geringe Wärmeleitfähigkeit der Luft kann aber auch von großem Nutzen sein. Sie wirkt beispielsweise bei Daunenjacken hervorragend als Isolator, sodass kaum Wärme nach außen hin übertragen werden kann. Vakuum hat eine Wärmeleitfähigkeit von $0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Das ist der Grund für die nahezu luftleere Schicht im Inneren einer Thermosflasche.

12. Experimente zur Kerzenflamme

12.1. Experiment 21: Nachweis der heißesten Flammenzone



Abb. 36: Nachweis Flammenzone

Material:

- Starkes weißes Papier
- Sicherheitsnadel
- Teelicht

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die Vorbereitung dieses Experiments gestaltet sich sehr simpel. Die dafür notwendigen Utensilien findet man in jedem Haushalt. Nach dem Entzünden des Teelichts hält man das starke Papier nur kurz in die Kerzenflamme damit es nicht zu brennen beginnt. Dreht man das Papier um, ist ein ausgeprägter schwarzer Ring zu erkennen. Dasselbe kann man nun mit einer Sicherheitsnadel wiederholen. Hier empfiehlt es sich, eine Vorrichtung zu bauen, um die Sicherheitsnadel möglichst ruhig in der Flamme zu halten. Nach längerem Hineinhalten kann man feststellen, dass zum einen die Nadel am Rand der Flamme zu glühen beginnt, zum anderen sieht man aber deutlich eine Anhäufung von Ruß an den Randgebieten. Vorsicht ist vor allem bei der Sicherheitsnadel geboten, da diese sehr heiß wird. In diesem Experiment wurde sie mittels zweier Neodym – Magneten fixiert.

Physikalische Erklärung:

Aus dem Ring lässt sich ableiten, dass es zumindest zwei verschiedene Gebiete gibt. Einerseits das unberührte weiße Gebiet in der Mitte, andererseits das schwarze ringförmige Gebiet außen herum. Es handelt sich dabei um Ruß, also Kohlenstoffpartikel. Diese Partikel werden in den heißeren Gebieten erzeugt, wohingegen in der Mitte, also den Zonen mit blauer Flamme, eine Verbrennung bei geringerer Temperatur und ohne Bildung von Kohlenstoffpartikeln herrscht. Außen hingegen herrschen heißere Temperaturen und es werden Partikel gebildet, welche sich am Papier absetzen (Kapitel 8). Selbiges lässt sich bei der Sicherheitsnadel beobachten (vgl. Lange, 2016, S. 16).

Bemerkung:

Bei der Durchführung des Experiments mit der Sicherheitsnadel ist darauf zu achten, dass die Flamme ruhig brennt und sich der Draht wirklich in der Mitte der Flamme befindet. Bei heftigen Bewegungen aufgrund von Luftzügen kann der Effekt nicht so klar dargestellt werden.

12.2. Experiment 22: Schlieren über Kerzenflamme projizieren

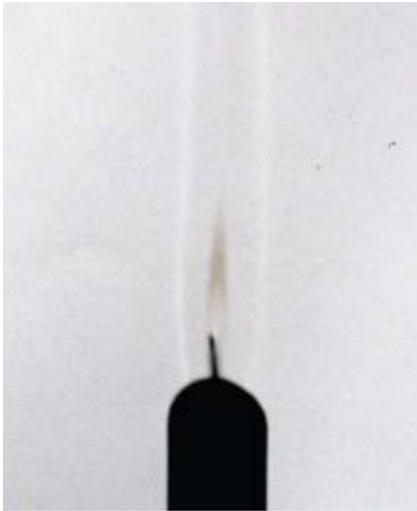


Abb. 37: Schlieren
(Schlichting, 2011, S. 41)

Material:

- Kerze
- Lichtquelle
- weißer Hintergrund

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Man nimmt sich eine Kerze und stellt diese vor einen einfarbigen Hintergrund, am besten einen weißen, für sichtbares Licht undurchlässigen, wie zum Beispiel eine weiße Wand. Nun zündet man die Kerze an und beleuchtet sie mit einer Lichtquelle. An der Wand im Hintergrund kann man nun ein Schlierenbild der Kerze ausmachen. Dies wird oft auch in Büchern als sogenannte „Geisterflamme“ geführt.

Physikalische Erklärung:

Die Erklärung hierzu hat aber nichts mit einer Geisterflamme zu tun, denn im Prinzip kann man durch das Anleuchten der Flamme das Bild der Flamme an der Wand sehen oder besser gesagt den Schatten der warmen Luft der Flamme. Da warme Luft sich ausdehnt und somit eine geringere Dichte aufweist, werden die Lichtstrahlen unterschiedlich stark gebrochen. Das erfolgt nach der Formel vom

Brechungsgesetz wobei α der Einfallswinkel, β der Brechungswinkel und n_1/n_2 die jeweiligen Brechzahlen sind.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2} \quad (12.1)$$

Wenn die Kerzenflamme jetzt von einer Lichtquelle bestrahlt wird, dann wirft die Flamme im Hintergrunde ein Bild das aussieht wie eine Geisterflamme (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2015, S. 1011 - 1012).

Bemerkung:

Ein weiterer Beweis dieser Lichtbrechung lässt sich sehr gut in der Natur beobachten, wenn wir die Sonne noch am Horizont beobachten können, obwohl sie eigentlich schon unter diesem verschwunden ist.

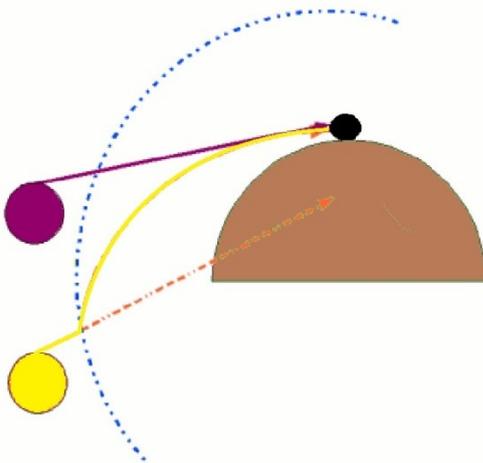


Abb. 38: Brechung in der Atmosphäre

Dieses Phänomen kann man gut in Abb. 38 beobachten. Hier stellt der braune Halbkreis die Erde, die blau gestrichelte Linie den Eintritt in die Atmosphäre, der schwarze Punkt den Beobachter und der gelbe Punkt die Sonne, dar. Die vom Punkt der Sonne ausgehende gelbe Linie ergibt sich aus der Brechung, die den Beobachter erreicht. Da das Gehirn nichts von der Krümmung weiß, verlängert es den einfallenden gekrümmten Strahl geradlinig nach hinten und man sieht die Position der Sonne wie sie am Bild violett dargestellt wird.

12.3. Experiment 23: Brennen tiefgefrorene Kerzen?

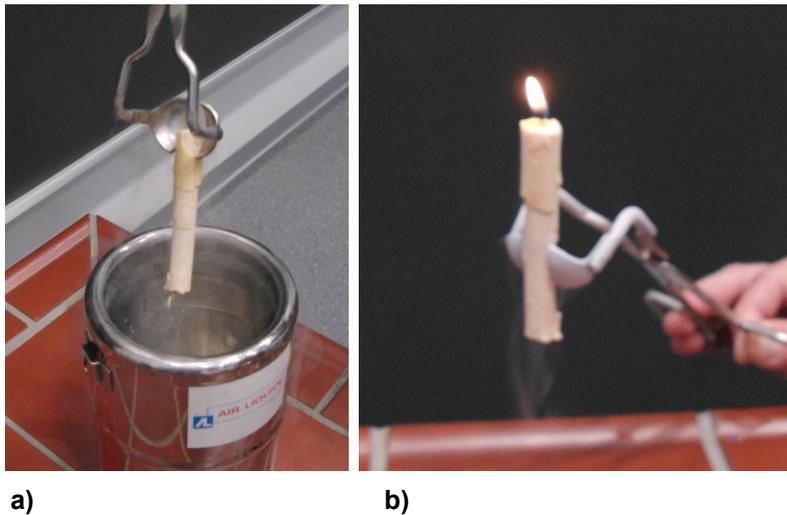


Abb. 39 a, b: a) Kerze nach dem Tieffrieren b) tiefgefrorene Kerze brennt

Material:

- Kerze
- Flüssiger Stickstoff

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Dieses Experiment ist ein sehr kurzer Versuch und soll veranschaulichen ob tiefgefrorene Kerzen überhaupt zum Brennen gebracht werden können. Dazu wird die Kerze in einem Behälter mit flüssigem Stickstoff gehalten. Da flüssiger Stickstoff eine Temperatur von -196 °C besitzt, kann man dann wirklich von einer tiefgefrorenen Kerze sprechen. Danach wird die Kerze herausgenommen und siehe da, wenn man sie anzündet, fängt sie zu brennen an.

Physikalische Erklärung:

Dass die Kerze brennt, auch wenn sie tiefgefroren wird, erklärt sich dadurch, dass trotz des gefrorenen Wachses genug Energie der zugeführten Flamme da ist um die Kerze anzuzünden. Wenn die Kerze einmal brennt erzeugt die Flamme genug eigene Energie um das Wachs aufzuschmelzen und den Verbrennungsvorgang aufrecht zu erhalten.

Bemerkung:

Außerdem lässt sich mit diesem Experiment gut zeigen, dass das Wachs im tiefgefrorenen Zustand sehr spröde wird. Dies ist gut in Abb. 40 dargestellt. Man sieht, dass die einzelnen Schichten des Wachses abblättern. Weiter kann man auch in der Farbe einen Unterschied zur Kerze in Zimmertemperatur feststellen.



Abb. 40: Gefrorene spröde Kerze im Vergleich mit herkömmlicher Kerze

12.4. Experiment 24: Konvektionsmotor



Abb. 41: Kerzenkarussell
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- Kerzenkarussell

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Man nimmt sich eine Kerze und stellt diese in ein Kerzenspiel. Nun zündet man die Kerze an und siehe da, dass Kerzenspiel fängt sich zum Drehen an.

Physikalische Erklärung:

Das Kerzenkarussell funktioniert über den sogenannten Konvektionsmotor. Wie in Experiment 12 schon näher behandelt, steigen die heißen Verbrennungsgase der Kerze auf und von unten kommt kühlere Luft nach, was über Konvektion funktioniert. Wenn man nun über der Flamme ein frei gelagertes Kerzenkarussell anbringt, das direkt über der Flamme, in Kreisordnung, Rotorblätter besitzt, wird über die aufsteigende Luft das Karussell in Drehung versetzt. Dazu müssen die Rotorblätter in einem Winkel 45° zur Flamme stehen, weil sonst die aufströmenden Gase keine Drehung des Karussells hervorrufen können.

Bemerkung:

Diese Anordnung der Rotorblätter wurde schon viel früher genutzt um mit Hilfe des Windes mechanische Arbeit zu verrichten zu können. Eine der ersten solcher sogenannten Windräder war die Windmühle.

Die ersten Windmühlen die im persisch-afghanischen Grenzgebiet 644 nach Christus gefunden wurden, nutzten schon die Kraft von Strömungen um ihr Getreide zu mahlen, wie in Abb. 43 zu sehen. Die Chinesen nutzten diese Technik zum Entwässern ihrer Reisfelder (vgl. Hau, 2008, S. 2 - 3).



Abb. 42: Windmühle zum Entwässern der Reisfelder aus China (Hau, 2008, S. 3)



Abb. 43: Windmühle zum Getreidemahlen aus Afghanistan (Hau, 2008, S. 2)

Eine aus physikalischer Sicht vergleichbare Form zu einem Kerzenkarussell stellt ein Aufwindkraftwerk dar. Diese Aufwindkraftwerke basieren darauf, eine Luftströmung durch Erwärmung des sogenannten Kollektordaches zu erzeugen wie in Abb. 44 dargestellt.

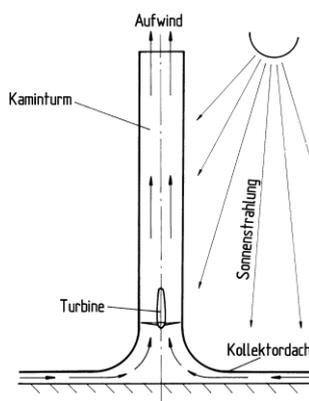


Abb. 44: Aufwindkraftwerk (Hau, 2008, S. 75)

Durch die auftretenden Dichteunterschiede bei der Erwärmung der Luft unter dem Kollektordach steigt die Luft nach oben und treibt im Kaminturm eine Turbine an, die dann über einen Generator Strom erzeugen kann (vgl. Hau, 2008, S. 75).

12.5. Experiment 25: Teebeutel steigen lassen



a)

b)

c)

Abb. 45 a, b, c: Brennender Teebeutel a) Beim Zünden b) Während dem Brennen c) Die Reste des Teebeutels steigen auf

Material:

- Kerze
- Teebeutel
- Schere

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Der Teebeutel muss vor dem Experiment so aufgeschnitten werden, dass ein Hohlzylinder entsteht. Weiter wird der Teebeutel auf einer Arbeitsfläche oder dem Boden aufgestellt und wird mittels einer Kerze am oberen Ende angezündet. Die Kerze muss nicht unbedingt Teil des Experimentes sein und es würde auch mit einem Feuerzeug funktionieren, aber dies gehört zur Show. Wenn der Teebeutel nahezu abgebrannt ist, dann steigt er auf im Raum und verbrennt zu Asche.

Physikalische Erklärung:

Auch dieses Experiment lässt sich über die Physik einer Kerzenflamme erklären. Bei Kerzen ist es oberhalb der Kerze viel wärmer als direkt neben der Kerze, was den Grund hat, dass warme Luft aufsteigt und die kalte Luft unten nachkommt, was wir als Konvektion kennen. Beim Teebeutel ist dies der gleiche Fall. Die warme Luft der Verbrennung steigt auf und reißt den Teebeutel mit nach oben und es scheint als ob der Teebeutel fliegt.

13. Experimente zur Lichttechnik

Um die folgenden Experimente zu beschreiben, ist es hilfreich einige Begriffe aus der Lichttechnik zu kennen. Dazu gehören die photometrischen Größen, die hier kurz beschrieben werden. Die photometrischen Größen die alle aus den radiometrischen Größen abgeleitet sind, unterscheiden sich von diesen dadurch, dass sie die Empfindlichkeit des Betrachters ($v(\lambda)$ Kurve) mit einbeziehen und sie lassen sich alle auf eine Grundgröße zurückführen, nämlich die Größe der Lichtstärke, deren Einheit die Candela [cd] ist und definiert ist als:

„Eine Candela ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle, die in einer bestimmten Richtung monochromatisches Licht der Frequenz 540 THz (\triangleq Vakuumwellenlänge 555 nm) mit der Strahlstärke 1/863 W/Steradian aussendet.“ (Kuchling, 2014, S. 408)

Eine frühere Definition der Lichtstärke war die Hefnerkerze [HK], die im Experiment 26 genauer beschrieben wird. Die von einer Lichtquelle in alle Richtungen ausgestrahlte Lichtleistung gibt den Lichtstrom an und seine Einheit ist das Lumen [lm]. Eine weitere SI Einheit ist die Beleuchtungsintensität, die in Lux [lx] angegeben wird. Sie gibt den Lichtstrom auf eine definierte Fläche an (vgl. Meschede, 2015, S. 586 - 587). Aus diesen SI Einheiten lassen sich noch andere Größen ableiten, die hier aber nicht mehr beschrieben werden.

13.1. Experiment 26: Hefnerkerze



Abb. 46: Hefnerkerze

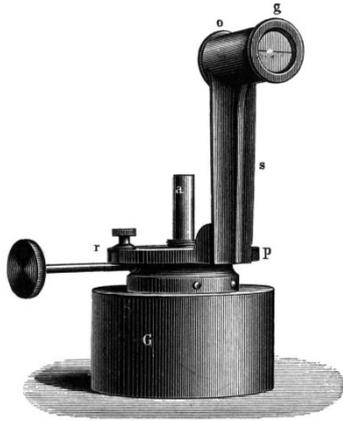
Material:

- Hefnerkerze

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Bei diesem kurzen Versuch geht es darum zu zeigen wie man auf die Einheit Hefnerkerze [HK] gekommen ist. Dazu wurde damals ein bestimmter Brennstoff aus Amylacetat verwendet, um eine möglichst weiß leuchtende Flamme zu bekommen. Der Docht ragt dabei in den Brennstoff und ist mittels eines Rädchens in der Höhe verstellbar. Der Docht wird angezündet und die Höhe der Flamme wird über die Rädchen auf genau 40 mm eingestellt (vgl. Hoppe, Lambertz, Mecke, Scheel, Timerding, 1926, S. 355). In Abb. 46 ist der Aufbau einer Hefnerkerze sehr gut dargestellt.

Zuerst wird der Brennstoff in den Behälter (G) eingefüllt. Dann wird der Docht im Zylinder (a) eingespannt und über die Rädchen (r) kann der Docht nun so eingestellt werden, dass die Flamme genau 40 mm hoch ist. Die genaue Einstellung wird über das Visier (g) vorgenommen, indem man genau die Spitze der Flamme durch das Visier sehen kann.



**Abb. 47: Aufbau
Hefnerkerze**
(<https://de.wikipedia.org/wiki/Hefnerkerze#/media/File:Hefnerlampe.png>)

Physikalische Erklärung:

Die Erklärung hierzu erfolgt so, dass man damals ein immer wieder reproduzierbares Experiment brauchte, um eine Stärke des Lichts festzulegen. Dazu hat man die Hefnerkerze genommen, die mit einer Flammenhöhe von 40 mm immer eine Lichtstärke von 1 HK besitzt. Somit ließ sich dieses Experiment immer wiederholen und man kam immer auf die gleiche Lichtstärke, außer man befand sich in einem Gebiet erhöhten Drucks oder die Luftfeuchtigkeit war anders, denn diese Faktoren hängen von der Lichtstärke der Flamme ab.

Bemerkung:

Zur Einleitung in Lichttechnik ist die Definition der Lichtstärke in Candela beschrieben worden. Der Zusammenhang der Einheit der Hefnerkerze zu Candela ergibt sich aus:
„1 Hefnerkerze ist 0,9 Candela.“

13.2. Experiment 27: Das Farbhufeisen



Abb. 48: Farbhufeisen mit Kerzen
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Eingefärbte Kerzen

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Einfache Darstellung des Farbhufeisens durch eingefärbte Kerzen. Dazu stellt man die verschieden farbigen Kerzen so in einer Reihe auf, dass sie das gesamte Farbhufeisen von blau bis rot zeigen wie links in Abb. 48 zu sehen. Rechts sieht man eine schwarze, eine weiße und eine purpurne Kerze, wobei die ersten Beiden den Unbuntpunkt und die dritte (purpurne) Kerze die Purpurlinie symbolisieren.

Physikalische Erklärung:

Diese Darstellung dient dazu das Farbhufeisen zu zeigen und eine Einführung in die Lichttechnik zu geben. Das Farbhufeisen ist eine mathematische Beschreibung der spektralen Farben und deren Mischungen und wurde zur besseren Darstellung und Berechenbarkeit entwickelt. Es entstand ein System mit x-, y- und z-Komponenten, wobei die Summe der Anteile aller Komponenten eins ist ($x + y + z = 1$). Somit kann jede Farbe beschrieben werden wenn man nur die x- oder y-Komponente kennt, denn die z-Komponente lässt sich immer aus x und y berechnen. In Abb. 49 sind die Farborte der spektralen Farben auf dem Rand des Farbhufeisens sowie deren Mischungen im Inneren gut zu sehen.

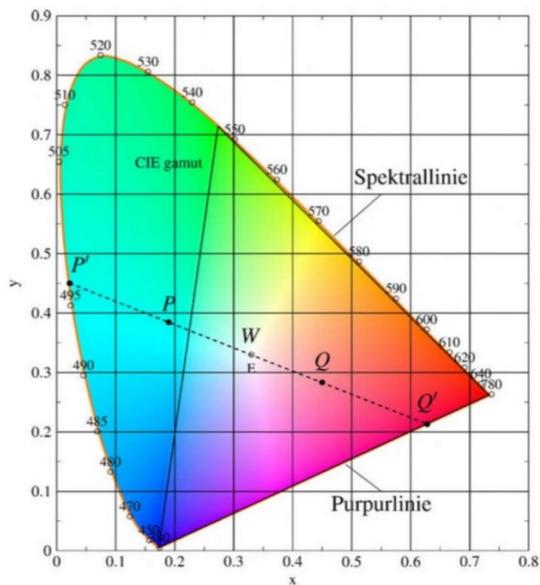


Abb. 49: Farbhufeisen (Priese, 2015, S.40)

Die Farborte gehen von blau auf der linken Seite über grün im oberen Bereich und rot rechts unten. In der Mitte liegt der sogenannte Unbuntpunkt (W), welcher außer schwarz oder weiß, keine Sättigung einer Spektralfarbe aufweist und definitionsgemäß bei $x = y = z = 0,33$ liegt. Jede Linie vom Unbuntpunkt in Richtung Farbhufeisen hat gleichwellenlanges Licht bei unterschiedlicher Sättigung welches durch den Punkt auf dem Farbhufeisen gegeben ist (In Richtung Purpurlinie nimmt man die Komplementärfarbe). Auf der Purpurlinie sind nur Mischungen von Farben zu Purpur- und Violettfarbtönen angeordnet und deshalb steht die purpurne Kerze (Abb. 48 rechts) auch nicht in der Reihe der färbigen Kerzen weil es sich um eine Mischform handelt (vgl. Hackstein, Below, & Heeg, 1986, S. 503).

Zieht man eine Gerade zwischen zwei Punkten am Hufeisen kann man mit den entsprechenden Farben additiv jede Farbe auf der Gerade zwischen den Punkten mischen.

Bemerkung

Der am meist verbreitete Farbraum in der Informatik ist der RGB-Farbraum. Dieser arbeitet nur mit den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau. Würde man diese Farben zu gleichen Teilen mischen, würde man weiß erhalten. Dieses additive Mischungsverfahren wird in der Farbfernseh- und Computertechnik eingesetzt (vgl. Priese, 2015, S. 41 - 42).

13.3. Experiment 28: Spektrum einer Kerzenflamme



Abb. 50: Aufbau zu Spektrum einer Kerze

Material:

- Kerze
- Glasprisma
- Kerze

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

In Kapitel 10 (Abb. 24) wurde die spektrale Zerlegung des Kerzenlichts bereits mittels Spektralanalyse eines modernen Spektrometers und einer CD (Experiment 14) gezeigt. Ein weiteres Experiment um dies zu zeigen, erfolgt über den Einsatz eines Prismas. Dazu spannt man ein Prisma in eine Vorrichtung ein und stellt eine Kerze davor. Wenn man nun die Kerze anzündet und ein Blatt Papier an der richtigen Stelle dahinter hält, dann kann man die Farben einer Kerze sehen.

Physikalische Erklärung:

Die Brechzahl eines Stoffes hängt bei Licht von der Farbe ab und deshalb von ihrer Wellenlänge und wird als Dispersion bezeichnet. Die Brechung bei Glas und in unserem Fall beim Glasprisma, nimmt bei ansteigender Wellenlänge ab. So wird der rote Anteil, des Lichtes weniger stark gebrochen als der blaue Anteil da die Wellenlänge von rotem Licht höher ist als vom blauem. Dieser Unterschied der Brechung führt zur Dispersion des weißen Lichts in seine einzelnen Spektralfarben. Eine saubere Trennung kann nur bei einer definierten Richtung des Lichtes entstehen, was wir bei unserer Kerze nicht haben und deshalb der Übergang der

Farben fließend passiert (vgl. Meschede, 2015, S. 503). Aufgrund des Fehlens einer Spaltblende, ist die Abb. 51 relativ unscharf, da sich einzelne Bilder der Kerzenflamme überlagern. Mittels modernen Spektrometern lässt sich das Spektrum einer Kerzenflamme weitaus besser darstellen (Kapitel 10, Abb. 24).

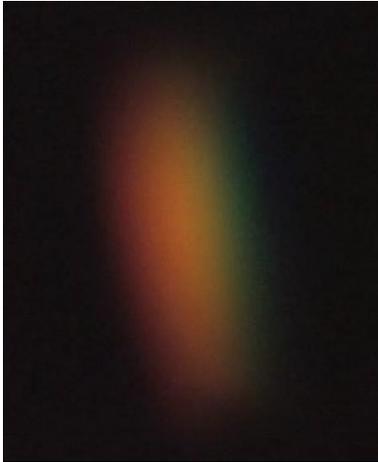


Abb. 51: Spektrum einer Kerze

Bemerkung:

Außerdem lässt sich mit dem Spektrometer neben den Farben einer Flamme und ihren Intensitäten, noch der Planck'sche Kurvenzug am Farbhufeisen auswerten. Das hier in Abb. 52 aufgenommene Bild zeigt dies anhand der roten Kurve am Farbhufeisen. Der Farbort ist dabei als roter Querstrich erkennbar. Dieses Bild wurde von einem UPRtek Handspektrometer aufgenommen.

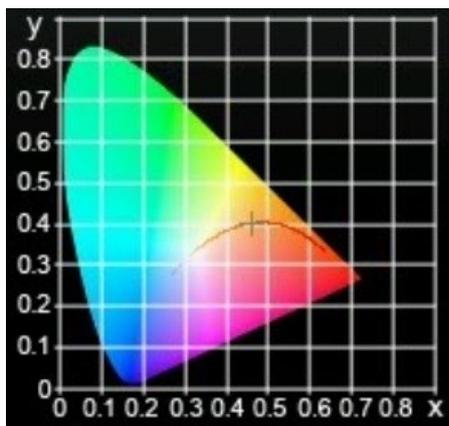


Abb. 52: Farbort der Kerzenflamme im Planck'schen Kurvenzug (UPRtek MK350N)

13.4. Experiment 29: Kerzenkorona



Abb. 53: Korona einer Kerze
(Schlichting, 2009)

Material:

- Kerze
- Overheadfolie

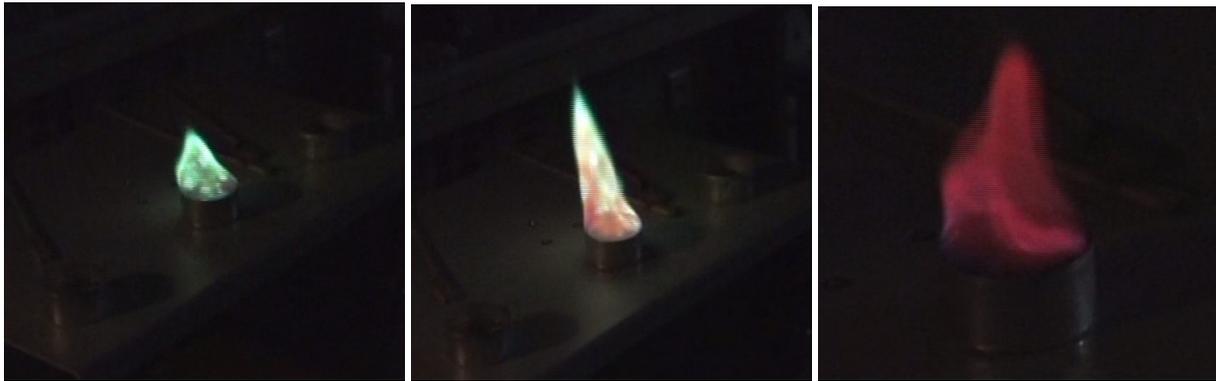
Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Um dieses Bild einer Kerzenkorona zu bekommen, sind eine Kerze, ein abgedunkelter Raum sowie eine Overheadfolie notwendig. Dabei wird die Kerze angezündet und die Overheadfolie so davor gehalten, dass man durch die Folie auf die Kerze blickt. Das dabei entstehende Bild ist eine wunderschöne Kerzenkorona.

Physikalische Erklärung:

So wie ein Prisma, beugt auch die Overheadfolie das Licht. Wenn man die Overheadfolie genauer betrachtet, dann würde man einen mikroskopisch feinen Belag ausmachen. Dieser besteht aus gleichgroßen und kreisrunden Partikeln, die das einfallende Licht unterschiedlicher Wellenlängen beugen und eine Korona in den Spektralfarben der Kerzenflamme entstehen lassen (gleicher Effekt wie bei Experiment 28).

13.5. Experiment 30: Ampelflamme



a)

b)

c)

Abb. 54 a, b, c: Ampelflamme a) Grüne Flamme b) Gelbe Flamme c) Rote Flamme (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Teelichtbecher
- 80 % Alkohol
- Kupfersulfat
- Strontiumnitrat
- Lithiumchlorid

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Dieses Experiment sollte vorher Zuhause probiert werden, um das Richtige Mischungsverhältnis der drei Stoffe zu bekommen. Dazu werden das Kupfersulfat, das Strontiumnitrat und das Lithiumchlorid in einem Gefäß mit dem Alkohol gemischt und verschlossen. Das beste Mischungsverhältnis lässt sich durch Probieren erreichen. Für das Experiment wird die Mischung in einen Teelichtbecher oder ein ähnliches Gefäß geschüttet und angezündet. Jetzt sollte nach kurzem Brennen die Flamme zuerst grün werden und nach etwas Zeit ins Gelbliche gehen und zum Schluss rötlich werden.

Physikalische Erklärung:

Die grünliche Flammenfärbung am Anfang bekommt man über den Zusatz von Kupfersulfat, denn Kupfer hat bei der Verbrennung eine bläulich-grüne Flammenfärbung. Wenn sich nun bei der Verbrennung das Kupfer mit dem Strontium mischt, bekommt man eine gelbliche Flammenfarbe, denn mit dem Grün aus dem

Kupfer und der rötlichen Flammenfärbung von Strontium, entsteht eine gelbliche Flamme. Zum Schluss bekommt man noch die rote Flammenfärbung über den Zusatz von Lithiumchlorid, das kirschrot verbrennt. Bei richtigem Mischungsverhältnis sollte die Flamme zuerst grün, dann gelb und zum Schluss rot leuchten.

Bemerkung:

Ein weiterer Stoff um eine grüne Flammenfärbung zu erhalten, wäre Barium, dessen Flamme fahlgrün brennt. Um eine gelbliche Flammenfärbung zu erhalten nimmt man Natrium, dessen Flamme dottergelb brennt und um eine schöne Rotfärbung der Flamme zu erhalten, kann man außer Lithium noch Kalium oder Calcium nehmen (vgl. Welsch & Liebmann, 2012, S. 61 - 77).

14. Experimente zum Anzünden von Kerzen

Aus Versuchen von Herrn Prof. Pottlacher und den Experimenten der Autoren kann gefolgert werden, dass sich Kerzen nur mit einer offenen Flamme, oder einem Funken, entzünden lassen. Für alle folgenden Versuche, in denen keine offenen Flammen zur Zündung verwendet wurden, hat man es unter Zuhilfenahme von Zündholzköpfchen dennoch geschafft, den Docht anzuzünden. Diese wurden nahe am Docht montiert und gewährleisteten ausreichend Hitze, um die Kerze zu entflammen. Ohne dem Zündholzköpfchen begannen die Dochte lediglich zu rauchen. Der Hintergrundgedanke dieser Montage war es, dem Publikum der Weihnachtsvorlesung, den gewissen „Aha Effekt“ zu vermitteln.

14.1. Experiment 31: Anzünden einer Kerze mittels Zündholz



Abb. 55 Brennendes Zündholz (pixabay)

Material:

- Zündhölzer
- Kerze

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Der Versuchsaufbau ist denkbar simpel. Man entnimmt der Zündholzpackung ein Zündholz, reibt das Zündköpfchen an der Reibfläche und das Zündholz beginnt zu brennen. Mit dieser Flamme ist man nun in der Lage die Kerze anzuzünden.

Physikalische Erklärung:

Der Zündholzkopf zeigt sich in seiner typischen tropfenartigen Form. Die Zündmasse besteht dabei aus einer Schwefelverbindung (Antimonsulfid) als Reduktionsmittel und einer sauerstoffabgebenden Verbindung, dem Kaliumchlorat. Zusätzlich werden Bindemittel und Farbstoffe beigemischt. Die Reibfläche selbst besteht aus rotem Phosphor, Klebstoff und einem feinen, harten Pulver. Als Pulver eignet sich dabei Glaspulver, Bimssteinpulver oder Schmirgelpulver. Es dient dem Aufräumen der Oberfläche und somit einer Steigerung der Reibungswärme. Beim Reibvorgang entzündet sich der rote Phosphor und überträgt die Energie dabei auf das Chlorat des Zündholzkopfes, wodurch die ganze Zündmasse des Kopfes Feuer fängt. Zur Erleichterung der Entflammung des Holzes dient eine Paraffinschicht unterhalb des Zündkopfes. Beachtlich dabei ist die Temperatur die während des Entzündens auftritt. Diese befindet sich im Bereich von 1350 – 1930 °C und dient einer raschen Entzündung des Holzes. Die Energie der Zündholzflamme reicht nun aus, um die Kerze anzuzünden.

Bemerkung:

Aufgrund des leicht entzündlichen roten Phosphors auf der Reibfläche anstatt im Zündköpfchen selbst, wird es auch Sicherheitsstreichholz genannt, da eine Entzündung ohne der Reibfläche kaum möglich ist. Dass der Phosphor beim Reibvorgang aus der Oberfläche gerissen wird zeigt sich, indem helle Streifen zurückbleiben. Zudem äußert sich die Verbrennung dessen in einer gelblichen Flamme unter weißer Rauchentwicklung. Der penetrante Geruch rührt dabei vom Schwefel her (vgl. Raaf, 1982, S. 306 - 307).

14.2. Experiment 32: Kerze über Dampfschlauch anzünden



Abb. 56: Hüpfende Flamme
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- Löschglocke
- Feuerzeug

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zuerst zündet man die Kerze an und lässt diese für kurze Zeit brennen. Anschließend bringt man mittels Löschglocke die Flamme zum „Ersticken“. Nach dem Entfernen der Glocke bildet sich weißer Dampf, welcher schlauchartig nach oben steigt. Führt man nun die Flamme eines Feuerzeugs an den Schlauch, so „hüpft“ diese förmlich auf den Docht und entzündet diesen.

Physikalische Erklärung:

Nach dem Auslöschen der Kerzenflamme bleibt Wachsdampf zurück. Aufgrund der Restwärme und der daraus resultierenden Konvektion steigt dieser auf und bildet die schlauchartige Form. Fügt man dem Dampf nun mittels Feuerzeugflamme Wärme zu, so entzündet sich dieser und leitet die Flamme dabei bis an den Docht. Hier reicht auch aufgrund der vorhandenen Restwärme die Temperatur aus, um den Docht erneut anzuzünden.

Bemerkung:

Wichtig bei diesem Versuch ist es, dass sich die Kerze an einem windstillen Ort befindet, da sich sonst der Wachsdampf aufgrund von Luftströmungen verflüchtigen würde. Ebenso sollte die Löschglocke nicht zu schnell entfernt werden, um Luftwirbel zu vermeiden. Versuche haben gezeigt, dass sich der brennbare Dampfschlauch bis auf Höhen um 10 cm erstrecken kann.

14.3. Experiment 33: Anzünden einer Kerze mit einem Hohlspiegel

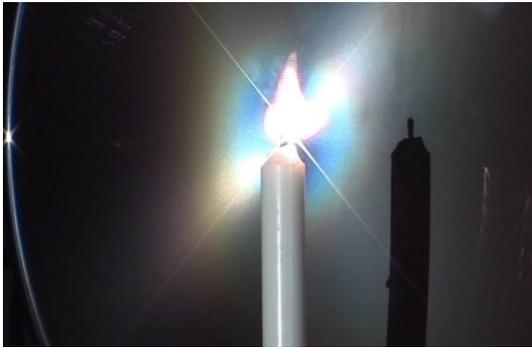


Abb. 57: Kerze im Fokus eines Hohlspiegels (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Hohlspiegel ($f = 16 \text{ cm}$; $d = 39 \text{ cm}$)
- Kerze
- Zündholzköpfchen
- Bogenlampe
- Stativmaterial

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zunächst wird die Kerze mit einem Zündholzköpfchen bestückt. Dies soll sich so nahe wie möglich am Docht befinden. Der Hohlspiegel sowie die Kerze werden mittels Stativmaterial hintereinander angebracht. Es empfiehlt sich hier in jedem Fall ein Schienensystem zu verwenden, da dies die spätere Justierung vereinfacht. Sind die beiden Komponenten grob eingestellt, wird die Bogenlampe, samt Linse, ein paar Meter entfernt eingerichtet und das Parallelstrahlbündel zielt genau auf die Mitte des Hohlspiegels. Schaltet man die Bogenlampe ein, hilft am besten ein Stück Papier, um den Fokus des Hohlspiegels zu ermitteln. Durch das Wissen, dass dieser bei 16 cm ist, sollte dies recht rasch vonstattengehen. Bringt man das Zündholzköpfchen in den Fokus, entflammt dieses und die Kerze wird angezündet. Aufgrund der extremen Helligkeit im Fokus, ist das Tragen einer geeigneten Schutzbrille unabdingbar.

Physikalische Erklärung:

Parallel einfallende Lichtstrahlen, wie jene von der Bogenlampe, treffen auf den Hohlspiegel und werden reflektiert. Mittelpunkts nahe Strahlen, wie jene im Experiment, schneiden dabei die Mittelachse in einem Punkt, den durch die Form des Spiegels vorgegebenen Brennpunkt oder Fokus F . Somit werden alle Strahlen in der Nähe des Mittelpunkts in diesem Punkt gebündelt (vgl. Demtröder, 2012, S. 277). Dadurch entsteht eine immense Hitze, welche ausreicht, um das Kaliumchlorat des Zündholzköpfchens zu entzünden, was wiederum den Doch der Kerze entflammt.

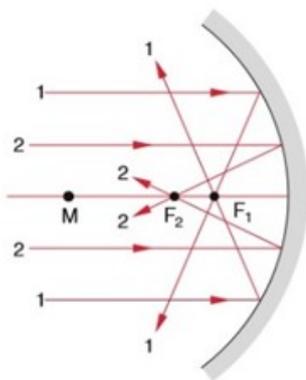


Abb. 58: Brennweite f für achsenferne Strahlen kleiner als für achsennahe Strahlen (Demtröder, 2012, S. 277)

Bemerkung:

Für achsenfernere Strahlen gilt die vorgegebene Brennweite nicht mehr. Diese rückt, mit steigendem Abstand der Strahlen zur Mittelachse, immer weiter zum Hohlspiegel, wird also kleiner. Möchte man diesem Effekt entgegenwirken, eignen sich dafür Parabolspiegel (vgl. Kuchling, 2014, S. 362). Deren Querschnitt gleicht einer Parabel, und hat somit die Eigenschaft alle auftreffenden Lichtstrahlen in einem Punkt zu bündeln. Dieses einfache Prinzip findet mittlerweile großen Anklang bei der Energiegewinnung. Solarthermische Kraftwerke erzeugen aus der Wärmeenergie der Sonne elektrischen Strom. Dafür verwendet man sogenannte Parabolrinnenkollektoren. In deren Brennpunkt befindet sich eine Rohrleitung, gefüllt mit Wasser. Das Wasser wird erhitzt, zu einer Dampfturbine weitergeleitet und elektrischer Strom produziert. Die Rohre sind dabei so konstruiert, dass man eine maximale Absorption an Sonnenstrahlen und eine minimale Wärmerückstrahlung erreicht. Um ein

Maximum an erzeugtem Strom zu erreichen, sind solche Kraftwerke an Orte hoher Sonnenscheindauer gebunden. Eine maximale Leistung von 250 Megawatt pro Einheit ist in Bezug auf die Weltenergieversorgung nennenswert und das Ganze geschieht noch ohne Schadstoffemission. Der „unbegrenzte“ Energielieferant Sonne ist dabei nicht außer Acht zu lassen (vgl. Scholz, 2013, S. 54 - 55).

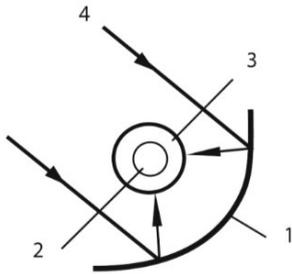


Abb. 59: Parabolrinne
(Scholz, 2013, S. 56)

14.4. Experiment 34: Anzünden einer Kerze mit einer Linse



Abb. 60: Kerze im Fokus einer Linse

Material:

- Linse
- Kerze
- Zündholzköpfchen
- Kohlebogenlampe
- Stativmaterial
- Schweißer-Schutzbrille

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zu Beginn der Vorbereitungen wird die Kerze mit einem Zündholzköpfchen nahe des Dochts bestückt. Am Schienensystem werden zuerst die Bogenlampe, dann die Linse und schließlich die Kerze fixiert. Es empfiehlt sich die Linse direkt auf die Öffnung der Bogenlampe zu setzen. Danach wird das Abbild der punktförmigen Lichtquelle (Kohlebogenlampe), auf der Seite der Kerze gesucht. Dazu eignet sich zunächst ein Blatt Papier. Da die Kerze sowohl auf der Schiene verschoben, als auch in der Höhe verstellt werden kann, lässt es sich recht exakt justieren. Hat man die richtige Justierung gefunden, so beginnt der Zündholzkopf zu rauchen, ehe er kurz darauf entflammt und den Docht anzündet. Aufgrund der extremen Helligkeit im Brennpunkt muss eine Schweißer-Schutzbrille getragen werden, um etwaigen Schädigungen der Augen vorzubeugen.

Physikalische Erklärung:

Treffen Lichtstrahlen auf eine Grenzfläche zweier Medien, so werden diese gebrochen. Bei Linsen tritt genau dieses Phänomen auf. Dabei werden parallel einfallende Strahlen so abgelenkt, dass sie sich dahinter in einem Punkt treffen, dem Brennpunkt F , welcher durch die Brennweite f definiert ist (vgl. Demtröder, 2012, S. 270). Eine Sammellinse hat aber auch die Eigenschaft, dass von einem Punkt ausgehende Licht (kegelförmig), wieder in einem Punkt (Bildpunkt) zu vereinigen. Einzige Voraussetzung dafür ist, dass sich der Gegenstand außerhalb der Brennweite befindet (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2009, S. 1060). Justiert man nun die Kerze samt Zündholzköpfchen genau so, dass diese sich genau im Bildpunkt (Lichtquelle) befindet, so führt die gebündelte Wärmeenergie des Lichts dazu, dass das Zündholzköpfchen sehr heiß wird. Die Hitze reicht aus um das darin befindliche Kaliumchlorat zu entzünden. Die bei der Verbrennung entstehende Hitze reicht wiederum aus um den Docht anzuzünden. Sieht man sich das Phänomen vom physikalischen Standpunkt etwas genauer an, stellt man fest, dass sich nicht alle Strahlen im Bildpunkt treffen. Umso größer die Winkel der auftreffenden Strahlen zur Mittelachse sind, desto stärker werden diese gebrochen. Die Abbildung erscheint dabei unscharf. Dieser Zusammenhang ist besser bekannt unter dem Begriff sphärische Aberration (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2009, S. 1062).

Bemerkung:

Ein Start-up unter der Führung von André Brösel hat es sich zum Ziel gesetzt aus der Technologie der Linsen Energie zu gewinnen. Er setzt dabei nicht auf eine gewöhnliche Linse, sondern vielmehr auf eine Glaskugel, welche dieselben optischen Eigenschaften aufweist wie eine Linse. Diese soll das Sonnenlicht in einem Punkt bündeln. Dort befindet sich ein Kollektor, ein zusammengesetzte Modul aus Solarzellen und kleinen wärmebetriebenen Generatoren, welcher in der Lage sein soll, Sonnenenergie effizient in elektrische Energie umzuwandeln. Zudem erarbeitete sich das Team rund um Brösel ein intelligentes Trackingsystem, welches den optimalen Einfallswinkel des gebündelten Strahls auf den Kollektor garantiert. Ein großer Vorteil gegenüber fixen Systemen, bei denen die Energieeffizienz im Laufe des Tages, aufgrund des Wanderns der Sonne starken Schwankungen unterliegt (vgl. Rawlemon, 2016).

14.5. Experiment 35: Anzünden von Kerzen mit einem Laser



Abb. 61: Laserstrahl trifft Kerze
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Handlaser ($P = 300 \text{ mW}$; $\lambda = 600 \text{ nm}$ – sehr gefährlich)
- 5 Kerzen
- Zündhölzer

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die fünf Kerzen werden zunächst mit je einem Zündholzköpfchen nahe dem Docht bestückt. Dazu empfiehlt es sich das Wachs der Kerze etwas zu erwärmen, um das Einbringen der Köpfchen zu erleichtern. Nachdem man die Kerzen der Reihe nach aufgestellt hat, platziert man den Laser senkrecht über der Kerze und zielt auf die Zündholzköpfchen. Diese beginnen erst zu rauchen, ehe sie gleich darauf entflammen und den Docht der Kerze anzünden.

Physikalische Erklärung:

Zusätzlich zur hohen Ausgangsleistung ist am Laser noch eine Fokussierungslinse angebracht, was den Strahl nochmals bündelt und somit die Intensität erhöht. Trifft nun der energiereiche Strahl, dessen Wellenlänge bei 600 nm (rotes Licht) liegt, auf den Zündholzkopf wird ein Großteil der Energie auf diesen übertragen. Die dabei entstehende Hitze reicht aus, um das im Zündholzkopf befindliche Kaliumchlorat zu entzünden (Experiment 31). Die hohen Temperaturen reichen dabei aus, um das Wachs des Dochts zu schmelzen, zu verdampfen und schließlich zu entzünden.

Bemerkung:

Oft orientiert man sich bei Lasern an deren Leistung. Im Fall des Experiments liegt diese bei 300 mW, also 0,3 W. Es liegt nahe zu sagen, eine Glühlampe mit 100 W bringe mehr Leistung. Dies stimmt jedoch nicht. Um ihre Leuchtkraft für den Dauerbetrieb zu erreichen, muss man 100 W an Leistung hineinstecken. Davon werden jedoch nur ungefähr 3 W als Licht in alle Raumrichtung emittiert. Der Rest geht als Wärme verloren. Bei einem gebündelten Laserlicht sieht das Ganze etwas anders aus. Dort würden die 3 W Leistung konzentriert auf eine kleine Fläche auftreffen und bereits extrem gefährlich sein. Aus den Gegenüberstellungen geht hervor, dass es also nicht direkt auf die Leistung ankommt, sondern vielmehr auf die Leistungsdichte. Diese wird meist in Watt/cm^2 angegeben. Eine Glühlampe weist in einem Abstand von einem Meter eine Leistungsdichte von ungefähr $0,024 \text{ W/cm}^2$ auf. Selbige auf 1 mm konzentriert würde einen Wert von 380 W/cm^2 ergeben, was einer in etwa 16 Mio. mal höheren Intensität entspricht (vgl. Kilian & Aschemeier, 2012, S. 163).

Sicherheitshinweis:

Generell empfiehlt es sich, bei Arbeiten mit einem Laser, eine geeignete Laser-Schutzbrille zu tragen. Da es sich in diesem Fall um einen Laser mit immenser Ausgangleistung handelt, ist jedoch höchste Vorsicht geboten. Schon der kurze Kontakt, des Strahls mit dem Auge oder der Haut, kann zu schwerwiegenden Verletzungen führen. Es ist aber auch auf etwaige Streustrahlung zu achten, da auch diese noch schädigend ist. Aufgrund dessen ist auch beim Publikumsversuch äußerste Vorsicht geboten!

14.6. Experiment 36: Anzünden einer Kerze in der Mikrowelle

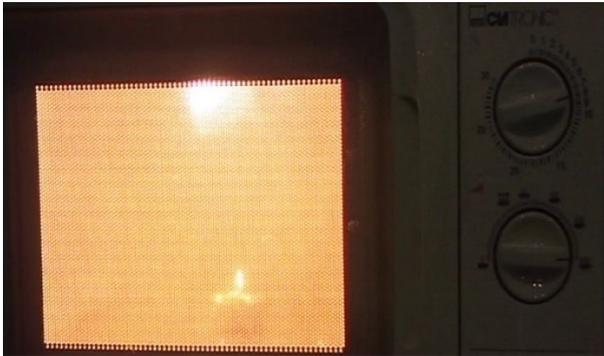


Abb. 62: Brennende Kerze mit elektrischer Entladung an der Seitenwand

Material:

- Mikrowelle
- Teelicht
- Korken
- Stahlwolle

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die hier verwendete Mikrowelle sollte ausschließlich experimentellen Zwecken dienen und nicht mehr im Haushalt verwendet werden. Der Versuchsaufbau gestaltet sich relativ einfach. Zuerst wird das Teelicht um den Doch mit einem kleinen Stück Stahlwolle bestückt. Daraufhin platziert man das Teelicht in der Mitte des Drehtellers auf einen Korken, schließt das Türchen und schaltet das Gerät ein. Dabei empfiehlt es sich die höchste Leistungsstufe zu wählen. Schon nach wenigen Sekunden kommt es im Garraum zur Erzeugung von Funken und plötzlich beginnt der Docht zu brennen.

Physikalische Erklärung:

Die mittels Magnetron erzeugte hochfrequente elektromagnetische Strahlung wird in den Garraum geleitet und trifft dabei auf das, im Normalfall zu erwärmende, Objekt. Im Falle des Experiments handelt es sich hier um das Teelicht und die Stahlwolle. Betrachtet man das Auftreffen elektromagnetischer Strahlung auf Metall, so wird diese entgegen der oftmaligen Meinung nicht vollkommen reflektiert. Ein Teil davon

dringt dabei in die obere Metallschicht ein, ehe sie dann zum größten Teil absorbiert wird. Die Eindringtiefe wird dabei als sogenannte Skintiefe bezeichnet und kann beispielsweise bei Spiegeln nur wenige Atomlagen betragen. Die Metallelektronen werden innerhalb der Skintiefe vom elektrischen Feld der elektromagnetischen Welle beschleunigt. Die führt vermehrt zu Stoßprozessen bei denen es zur Energiefreisetzung in Form von Wärme kommt. Handelt es sich um einen dicken metallischen Gegenstand, so wird die Wärme aufgrund der guten metallischen Wärmeleitfähigkeit rasch abgetragen. Ist der metallische Leiter, wie in diesem Fall, sehr dünn, kommt es zu einer erheblichen Temperaturerhöhung. Die Bildung der Funken lässt sich dabei auf die stärkeren elektrischen Felder zwischen den Fasern der Stahlwolle zurückführen, welche die Durchschlagsfeldstärke von Luft übertreffen (vgl. Berger, 2002, S. 13). Diese Gegebenheiten lassen das Wachs am Docht schmelzen, verdampfen und schließlich entzünden.

Bemerkung:

Dem Gerücht, dass man keine metallischen Gegenstände in den Mikrowellenherd geben darf, wirkt die Tatsache entgegen, dass es sich beim Gefäß des Teelichts um eine Aluminiumschale handelt. Diese bleibt unversehrt. Studien des Fraunhofer Instituts haben ergeben, dass das Aufwärmen von Speisen in Aluminiumschalen unter korrekter Anwendung absolut keine Gefahren birgt. In rund 200 Tests konnten demnach keine Zwischenfälle festgestellt werden, sofern sich nicht mehrere Aluschalen zugleich im Garraum befanden, die Schale nicht die Innenwand berührte, oder die Schale nicht mit Alufolie bedeckt war. Die erwärmten Speisen in den Aluschalen sollen auch appetitlicher aussehen und in einigen Fällen sogar ein besseres Aufwärmverhalten aufweisen. Die etwas längere Garzeit wird als kleiner Nachteil angeführt (vgl. Pfeifer, 2006, S. 32).

Sicherheitshinweis:

Dieses und das folgende Experiment dienen reinen Demonstrationszwecken und die Nachahmung geschieht auf eigene Gefahr. Grundsätzlich empfiehlt es sich Mikrowellengeräte nur noch für experimentelle Zwecke zu nutzen. Mikrowellengeräte sollte man nie leer betreiben, da man so Rückkopplungen des Magnetfeldes in das Magnetron riskiert, was zu Defekten des Gerätes führen kann. Bei den hier angeführten Experimenten ist vor allem auf die Restwärme der Objekte in der Mikrowelle zu achten, um etwaigen Verbrennungen vor zu beugen.

14.7. Experiment 37: Plasmaball in Mikrowelle



Abb. 63: Plasmaball erzeugt durch Mikrowellen

Material:

- Mikrowelle
- Kerze
- 4 Korken
- Laborglas

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die hier verwendete Mikrowelle sollte ausschließlich experimentellen Zwecken dienen und nicht mehr im Haushalt verwendet werden. Die Kerze wird am Stumpf leicht aufgeschmolzen und danach auf einem Korken befestigt. Dieser wird in der Mitte des Drehtellers platziert und die restlichen drei Korken so herum platziert, dass man das Laborglas darauf setzen kann. Die Kerze in der Mitte wird entzündet und das Laborglas wie eine Hülle verkehrt darüber gestülpt. Vor dem Einschalten wird noch die höchste Leistungsstufe ausgewählt. Schon nach wenigen Sekunden erscheint unter heftigem Gebrumme ein greller Plasmaball.

Physikalische Erklärung:

„Erhitzt man ein Gas, werden bei Temperaturen oberhalb von etwa 0,1 eV entsprechend 1000 K mehr und mehr Moleküle dissoziiert und Atome ionisiert. Dies ändert grundlegend die physikalischen Eigenschaften. Die Ionisation führt vor allem dazu, dass das Gas elektrisch leitfähig wird. Langmuir hat 1929 für diesen 4. Aggregatzustand der Materie den Namen „Plasma“ eingeführt,

wobei Plasma griechisch „das Geformte“ oder „das Gebilde“ heißt.“
(Kaufmann, 2013, S. 1)

Bei der Verbrennung wird Kohlenstoff freigesetzt. Dieser ist mitunter elektrisch leitend und absorbiert die elektromagnetische Strahlung. Der Kohlenstoff erhitzt sich bei diesem Vorgang so stark, dass die Temperatur ausreicht um die umgebende Luft zu ionisieren. Daraus resultiert der markante Plasmaball. Das Laborglas dient lediglich dazu, dass der Plasmaball gehalten wird und nicht die Innenwände verbrennt.

Bemerkung:

Mikrowellenplasmen werden heute in der modernen Technik eingesetzt. Sie sind gut zu kontrollieren und finden beispielsweise Anwendung in der Mikroelektronik-industrie. Dabei können sehr dünne Schichten organischen, beziehungsweise anorganischen Materials abgetragen, oder aber auch Kunststoffschichten modifiziert werden, indem man ihnen dadurch eine bessere Benetzbarkeit verleiht und sie sich somit besser zum Anheften und Verkleben eignen. Die Hochfrequenzgeneratoren erzeugen dabei elektromagnetische Strahlung einer Frequenz von 2,45 GHz (vgl. Haefler, 1991, S. 143 - 147).

14.8. Experiment 38: Anzünden einer Kerze mit Hochspannungstransformator



Abb. 64: Versuchsaufbau Hochspannungstransformator mit Kerze (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Hochspannungstransformator
- Kerze
- Elektrode
- Draht

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Der Transformator, bestehend aus einer Primärspule (500 Wd.) und einer Sekundärspule (23 000 Wd,) verbunden mit einem Eisenkern, wird wie in Abb. 64 mittels Stativmaterial fixiert und ein Kabelausgang der Sekundärspule mit einer Elektrode versehen. Durch die Kerze selbst führt man ein Stück Draht, bei dem sich das Ende nahe dem Docht befindet. Zuletzt wird dieses Drahtstück samt Kerze am zweiten Ausgang der Sekundärspule fixiert. Mittels Kippschalter legt man nun eine Wechselspannung an die Primärspule an, was einen hellen Funken zwischen Elektrode und dem Draht, nahe dem Kerzendocht, zur Folge hat. Kurz nach dem Einschalten flammt der Docht der Kerze bereits auf.

Physikalische Erklärung:

Die grundlegenden Bestandteile eines Transformators setzen sich aus zwei Spulen und meist einem Eisenkern zusammen. Die Spulen haben unterschiedlich Windungszahlen und sind induktiv durch den Eisenkern gekoppelt. Entscheidend für

die Erzeugung der Wechselspannung ist dabei das Windungszahlenverhältnis n , also das Verhältnis der Windungszahlen von Sekundär- und Primärspule.

$N_{1/2}$ Windungsanzahl der Primär- und Sekundärspule

$U_{1/2}$ Spannung der Primär- und Sekundärspule

n Windungsverhältnis, auch Übersetzungsverhältnis \ddot{u}

Beim unbelasteten Transformator, also ohne Leistungsabgabe, gilt:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = n \quad (14.1)$$

Vernachlässigt man bei einem Transformator die geringen Verluste so gilt $P_1 = P_2$ und $P = U \cdot I$. Daraus ergibt sich $U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$ und führt zu:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_1}{I_2} = n \quad (14.2)$$

(vgl. Kuchling, 2014, S. 493 – 494) Die beim Einschalten des Transformators erzeugte Spannung führt zu einem Hochspannungsfunken, dessen Hitze sich auf den Docht der Kerze überträgt und diesen zum Brennen bringt.

Bemerkungen:

Die Anwendungsbereiche für Hochspannungstransformatoren erstrecken sich über viele Gebiete. Beim Schmelzen von Metallen beispielsweise verwendet man einen Transformator, deren Sekundärspule nur eine Wicklung, in Form eines Eisenrings mit Rinne, hat. Sofern der Schmelzpunkt des Metalls tiefer ist als jener des Eisenrings, schmilzt es aufgrund der enormen Temperatur in der Rinne des Rings. Man verwendet diese Transformatoren in Schmelzöfen zur Gewinnung von Aluminium und Edelstahl. Auch werden Transformatoren zum Punktschweißen von Stahlblechen eingesetzt. Der beim Zusammenführen der beiden Spitzenstifte der Sekundärspule erzeugte Hochstrom fließt dabei punktuell durch die beiden Bleche, schmilzt sie auf und verbindet sie. (vgl. Demtröder, 2012, S. 160).

Sicherheitshinweis:

Dieses Experiment sollte ausschließlich von erfahrenen Fachkräften durchgeführt werden und eignet sich keineswegs als Hausexperiment. Der Kontakt mit dem Hochspannungsfunken kann mitunter schwere Verbrennungen zur Folge haben.

15. Experimente zur Optik

Bevor jetzt einige Experimente mit Kerzen zum Bereich Optik kommen, erfolgt eine kurze Einführung über die Ursprünge der Optik bis zur heutigen Zeit. Erste Überlieferungen in denen Spiegel genutzt wurden, gibt es schon aus dem Jahr 1200 v.Chr. Damals benutzte man noch poliertes Kupfer und Bronze, erst später verwendete man für Spiegel eine zinnreiche Kupferlegierung. Im 17. Jahrhundert bekam die Optik ihren Aufschwung durch Galileo Galilei, der das Linsenfernrohr populär machte. Dann war da noch Johannes Kepler, der mit seinem Werk „Dioptrik“ die Grundlagen der Optik als Wissenschaft legte. Eine der Sternstunden für die Optik war mit Sicherheit das lang gesuchte Brechungsgesetz, das Willebrord Snell entwickelte und heute als das Snellius'sches Brechungsgesetz (Gl. 12.1) gilt und die Ablenkung von Lichtstrahlen beschreibt wenn sie von einem Medium durch ein anderes strahlen. Dies war der Anfang der modernen Optik. Der Physiker Isaac Newton folgerte später, dass weißes Licht eine Mischung verschiedener Farben ist, konnte die Aufspaltung des weißen Lichts über ein Prisma aber nicht erklären, denn die Wellentheorie in seiner früheren Form lehnte er ab. Einer der ersten, der die Wellentheorie annahm, war Christiaan Huygens, der richtig folgerte, dass sich Licht beim Eintritt in ein dichteres Medium verlangsamt. Er konnte somit das Reflexions- und Brechungsgesetz herleiten. Genauere Beschreibungen von Licht und Wellen folgten erst später aber für einen kurzen Einblick in die Anfänge der Optik reicht dieser kleine Exkurs (vgl. Hecht, 2009, S. 1 - 6).

15.1. Experiment 39: Physiker Adventkranz



Abb. 65: Gespiegelter Adventkranz
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- 2 x ebener Spiegel

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Man stellt eine Kerze auf einem flachen Untergrund, zündet sie an und platziert zwei ebene Spiegel so dahinter, dass, wenn man von vorne auf die Kerze blickt, wie in Abb. 65 zu sehen, sich die Kerze in den Spiegeln dahinter so spiegelt, dass ein virtueller Adventkranz entsteht.

Physikalische Erklärung:

Ein Spiegel reflektiert die Lichtstrahlen so, dass der einfallende Lichtstrahl den gleichen Winkel zur Oberfläche aufweist wie der reflektierte Strahl. Ein Beobachter kann die Reflexion nicht wahrnehmen, daher extrapoliert er die Strahlen nach hinten weiter und ein virtuelles Bild entsteht genau in der gleichen Entfernung wie der Gegenstand vor dem Spiegel. Es wird jeder Punkt des Gegenstands Punkt für Punkt in demselben Abstand hinter dem Spiegel aufgebaut (Abb. 66).

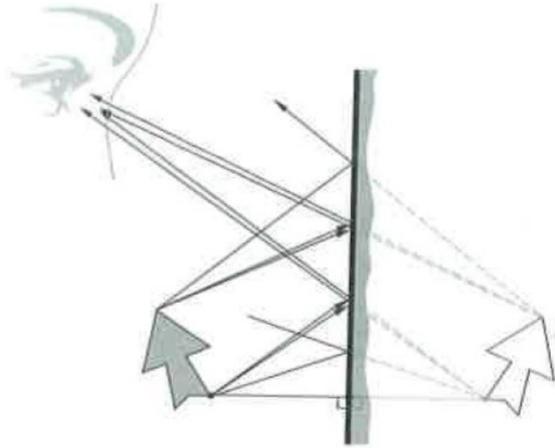


Abb. 66: Ebener Spiegel (Hecht, 2009, S. 295)

Ein weiteres Merkmal im Unterschied zur Linse ist, dass sich das Bild konstruieren lässt, indem man von jedem Punkt eine Senkrechte durch den Spiegel zeichnet und dadurch ein seitenverkehrtes Bild entsteht. Einen solchen Vorgang, bei dem ein rechtshändiges Koordinatensystem in einen linkshändigen Bildraum verwandelt wird, nennt man Inversion (vgl. Hecht, 2009, S. 295).

Bemerkung:

Dieser Adventkranz lässt sich natürlich noch erweitern auf mehrere Kerzen. Dazu müssen die Spiegel nur so gedreht werden, dass die Kerze sich öfter spiegelt und das geschieht bei einem kleineren Winkel zwischen den Spiegeln und bei gleicher Annäherung der Kerze an den Spiegeln wie hier in Abb. 67 gut zu sehen.



Abb. 67: Kranz mit Sieben Kerzen (Weihnachtsvorlesung 2012)

15.2. Experiment 40: Die Unendlichkeit

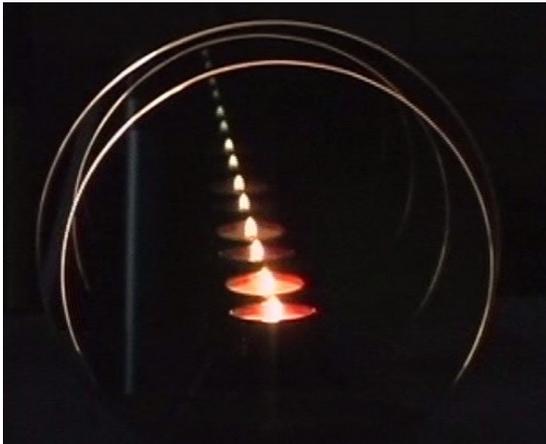


Abb. 68: Unendlich viele Teelichter
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- 2 x Spiegel (einer halbtransparent)

Vorbereitung und Durchführung:

Für diesen Versuch wird die Kerze zwischen zwei parallel aufgestellten Spiegeln gestellt, wie in Abb. 68 zu sehen. Den besten Abstand zwischen den Spiegeln für bessere Illustrationen findet man durch Probieren heraus. Jetzt wird die Kerze angezündet und der Raum, in dem der Versuch stattfindet am besten abgedunkelt und man sieht, wenn man an dem ersten Spiegel vorbei schaut, eine nahezu unendliche Reihe an Kerzenflammen.

Physikalische Erklärung:

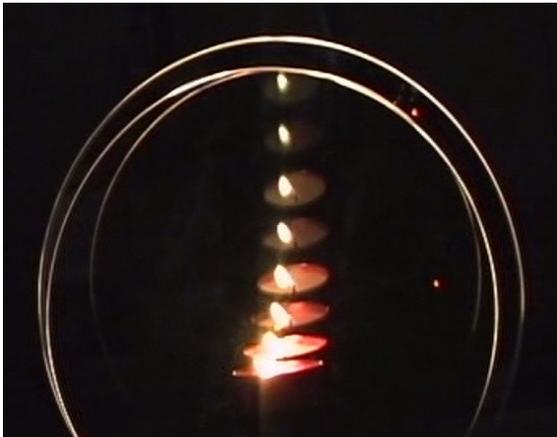
Die Erklärung hierzu erfolgt über die andauernde Reflexion der Kerze an beiden Spiegeln und des Spiegelbildes selbst. Da das Licht durch jede Reflexion an Energie verliert wird die Kerzenflamme immer schwächer reflektiert bis sie scheinbar erlischt. Deswegen kann man genau genommen gar nicht von einer Unendlichkeit sprechen, denn die Kerze verliert schon viel früher so viel an Lichtstärke, dass sie irgendwann nicht mehr reflektiert wird oder wir sie nicht mehr erkennen können.

Bemerkung:



**Abb. 69: Spiegelung an
Christbaumkugeln
(Weihnachtsvorlesung 2012)**

Dieser Versuch funktioniert natürlich auch mit mehreren Kerzen oder sogar mit Christbaumkugeln bei sphärischen Spiegelflächen wie in der Abb. 69 zu sehen. Wenn wir nun den hinteren Spiegel drehen würden, sodass der Raum zwischen den Spiegeln nach oben hin größer wird, dann krümmt sich die Abfolge der Kerzen nach oben. Das Gleiche würde bei anderer Drehung auch funktionieren, nur dass die Krümmung dann nach unten wandert.



**Abb. 70: Spiegelung nach oben gekrümmt
(Weihnachtsvorlesung 2012)**

15.3. Experiment 41: Schusterkugel



Abb. 71: Schusterkugel

Material:

- Kerze
- Glaskugel mit Wasser gefüllt
- Blatt Papier zur Illustration

Vorbereitung und Durchführung:

Eine Kerze wird so vor eine mit Wasser gefüllte Glaskugel gestellt, dass die Flamme der Kerze in etwa gleicher Höhe wie der Mittelpunkt der Glaskugel steht. Der Abstand zwischen der Glaskugel und der Kerze sollte größer sein wie die Brennweite der Glaskugel, weil sonst kein Bild zu sehen ist. Nun sucht man mit einem Blatt Papier auf der gegenüberliegenden Seite der Glaskugel das scharfe Abbild der Flamme.

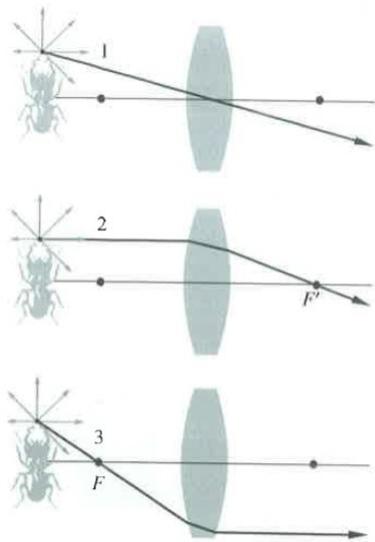
Dieses Abbild einer Flamme wurde früher für technische Arbeiten gebraucht, für die man eine hohe Lichtstärke benötigte, aber nicht zu nahe an einer Flamme arbeiten konnte, da die Hitze der Flamme den Aufenthalt dort nicht möglich gemacht hätte (vgl. Schramm, Schwarte, Lazardzig, 2006, S. 33 - 34).

Physikalische Erklärung:

Die mit Wasser gefüllte Glaskugel verhält sich wie eine Konvexlinse (Sammellinse). Ist der Gegenstand, in diesem Fall die Kerze, weiter weg als der Brennpunkt der Konvexlinse, entsteht hinter der Glaskugel ein reelles, doch verkehrtes Bild. Wenn

man den Brennpunkt einer Linse kennt, kann man Orientierung, Ort und Größe des Bildes, das entsteht, gut über das Strahlenverlaufdiagramm bestimmen.

In Abb. 72 wird der Strahlengang durch die Schusterkugel anhand eines Strahlenverlaufdiagramms gut veranschaulicht. Um das Bild aus dem Diagramm zu ermitteln braucht man eigentlich nur zwei Strahlengänge, der dritte Strahl kann aber als Kontrolle dienen. Dazu muss der Bildpunkt zu jedem Objektpunkt bestimmt werden. Der erste Strahlengang (1) ist nicht abgelenkt und geht durch den Mittelpunkt. Der zweite Strahl (2), der parallel zur Achse verläuft, wird über die Linse zum Brennpunkt gebrochen. Der dritte (3) Strahl geht zuerst durch den Brennpunkt und tritt durch die Linse parallel zur Achse wieder aus. Dort wo sich nun die Strahlen einander schneiden entsteht der Bildpunkt von dem Objektpunkt, von dem wir ausgegangen sind. Da unsere Kerze innerhalb der doppelten Brennweite steht, entsteht ein reelles, verkehrtes und vergrößertes Bild (vgl. Hecht, 2009, S. 273 - 278).



**Abb. 72: Strahlengänge
Konvexlinse (Hecht, 2009,
S. 273)**

Bemerkung:

Würde man die Kerze genau auf der doppelten Brennweite der Glaskugel platzieren, würde man ein gleich großes, reelles und verkehrtes Bild sehen. Bei einer Gegenstands Entfernung, die geringer als die Brennweite der Glaskugel ist, würde man hinter der Glaskugel kein scharfes Bild mehr ausmachen können, denn es entsteht ein virtuelles, aufrechtes und vergrößertes Bild hinter dem Gegenstand.

15.4. Experiment 42: Brechung der Kerze im Wasser

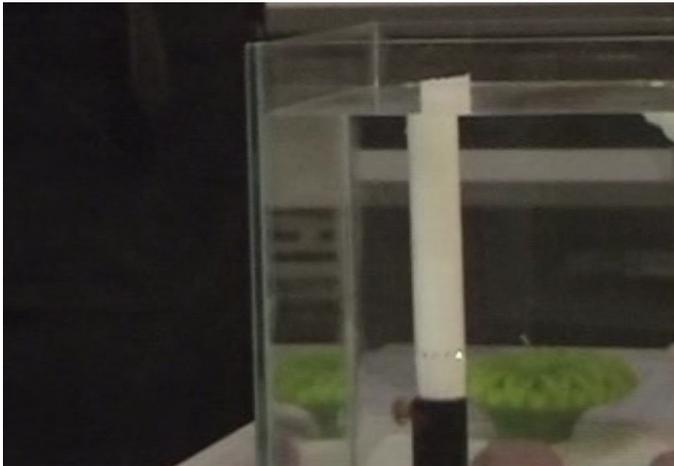


Abb. 73: Scheinbar geknickte Kerze
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- Gefäß mit Wasser

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Für die Vorbereitung für dieses Experiment braucht man nur ein Gefäß voll mit Wasser und eine längere Kerze. Die Kerze wird zur Hälfte ins Wasser gehalten und wenn man jetzt von vorne auf das Gefäß blickt, hat es den Anschein als ob die Kerze beim Wassereintritt durchgeschnitten und verschoben wäre.

Physikalische Erklärung:

Diese Verschiebung kommt von den unterschiedlich dichten Medien und der darin unterschiedlichen Geschwindigkeit von Licht. In diesem Fall handelt es sich beim ersten Medium um Luft und beim zweiten um Wasser. Ein Lichtstrahl, der auf zwei unterschiedlich dichten Medien unter einem bestimmten Winkel trifft, wird gebrochen und ein Teil davon reflektiert. Unter welchem Winkel der Strahl gebrochen wird hängt dabei vom Einfallswinkel und von den beidem Medien ab, welche der Lichtstrahl durchbricht.

Die Brechung wird mithilfe des Snellius'schen Brechungsgesetzes (Gl. 12.1) errechnet. Deshalb scheint es auch so als ob die Kerze an der Grenzfläche verschoben wäre.

Bemerkung:

Auch andere Flüssigkeiten würden sich für dieses Experiment eignen, doch müssen sie für Licht durchlässig sein.

15.5. Experiment 43: Schatten von Flammen

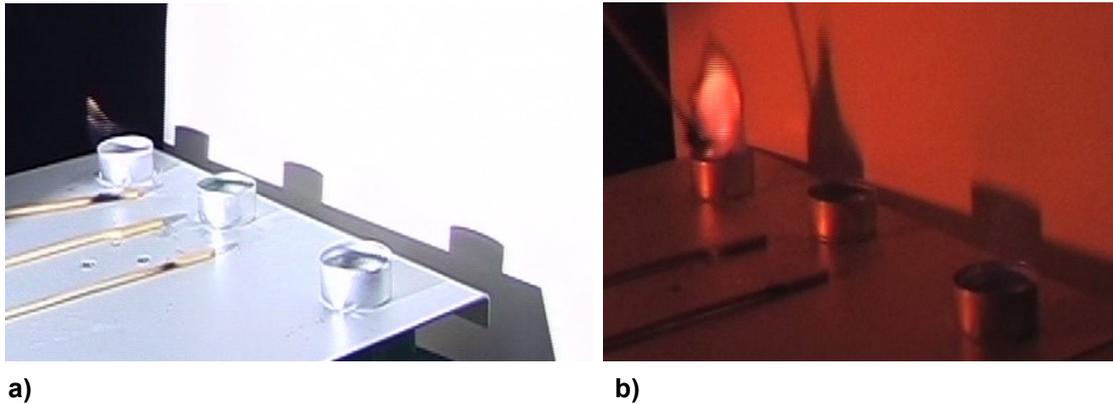


Abb. 74 a, b: Flamme mit und ohne Schatten a) Flammen im weißen Licht b) Flamme bestrahlt von Natriumdampfampe (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Behälter mit Alkohol (80 %) und Salz (NaCl)
- Behälter mit Alkohol (80 %) und Kupfersulfat
- Behälter mit Alkohol (80 %) und Lithiumchlorid

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die drei Behälter werden in einer Reihe aufgestellt und angezündet. Während man wartet bis sich die Flammen färben, dunkelt man den Raum ab und richtet eine Bogenlampe auf die Kerzen. Man schaltet die Bogenlampe ein und beleuchtet die Flamme. Wenn man jetzt ein Blatt Papier nimmt, kann man sehen, dass die Flammen keinen Schatten werfen. Nun beleuchtet man die Flammen mit einer Natriumdampfampe und wir können einen Schatten hinter der Natriumchlorid Flamme auf dem Blatt Papier ausmachen.

Physikalische Erklärung:

Das Leuchten der färbigen Flammen kommt aus den unterschiedlichen Zusätzen zur Flamme. So leuchtet eine Flamme, der Natriumchlorid hinzugefügt wird, gelblich, eine, der Kupfer hinzugefügt wird grünlich und einer mit Lithium versetzten wird rötlich. Die verschiedenartige Flammenfärbung entsteht dadurch, dass die Flammen, denen unterschiedliche Elemente beigelegt werden, Licht in spezifischer Wellenlänge emittieren. Bestrahlt man diese Flammen nun mit einem weißen Licht, wie in unserem Fall eine Bogenlampe, so sieht man keinen Schatten, denn weißes Licht wird von den Flammen nicht absorbiert. Bestrahlt man nun mit einer

Natriumdampflampe die Flammen, absorbiert die Natriumchlorid Flamme das Licht und wirft deshalb einen Schatten auf das Blatt dahinter.

Bemerkung:

Dadurch, dass die Färbung einer Flamme von den Eigenschaften eines Stoffes abhängt, wird sie zur qualitativen chemischen Analyse angewandt. Ein weiteres Gebiet wo die Färbung einer Flamme Anwendung findet, ist das Feuerwerk. Dieser, meist aus Schwarzpulver und verschiedenen Metallsalzen hergestellte Leuchtkörper, wird jedes Jahr zum Eintritt in das neue Jahr in die Lüfte geschossen und begeistert seit je her alle Menschen aus allen Teilen der Welt. Für die hohe Leuchtkraft kommt meist Magnesium zum Einsatz und für die verschiedenen Färbungen der Explosionen am Himmel sind die verschiedenen beigefügten Elemente verantwortlich. So leuchtet eine mit Kupfer und Barium versetzte Rakete grünlich, eine mit Kalium, Strontium oder Lithium versehene rötlich und eine mit Natriumchlorid vermengte Rakete gelblich oder die Rakete besteht aus einer Mischung aus diesen Elementen (vgl. Welsch & Liebmann, 2012, S. 384 - 385).



Abb. 75: Feuerwerk (pixabay)

15.6. Experiment 44: Kerze hinter Glas/Siliziumscheibe



a)

b)

Abb. 76 a, b: a) Kerze hinter Glas b) Hinter Siliziumscheibe

Material:

- Kerze
- Glasscheibe
- Siliziumscheibe
- Thermokamera (FLIR System T 360)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Der Aufbau für dieses Experiment erfolgt wie in Abb. 76 zu sehen. Dabei wird zuerst die Scheibe aus Glas in die Halterung gegeben. Wenn jetzt die Kerze dahinter angezündet wird, kann jeder von der anderen Seite durch das Glas die Flamme der Kerze sehen. Doch wenn man jetzt mit der Thermokamera durch das Glas auf die Kerze blickt, verschwindet die Kerze am Bild der Thermokamera. Jetzt wird das Glas ausgewechselt und stattdessen kommt eine Siliziumscheibe in die Halterung. Wenn man jetzt von der gegenüberliegenden Seite durch die Siliziumscheibe auf die Kerze blickt, dann kann man höchstens sein eigenes Spiegelbild sehen, aber keine Flamme. Dafür nimmt man jetzt wieder die Thermokamera in die Hand und zeigt damit durch die Siliziumscheibe auf die Kerzenflamme. Jetzt kann man ein Bild der Flamme auf dem Bildschirm sehen.

Physikalische Erklärung:

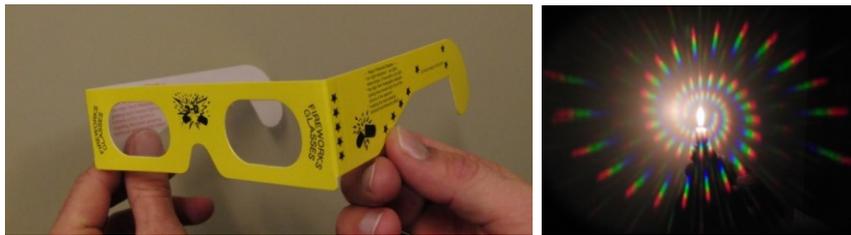
Dass Glas für das sichtbare Licht (Wellenbereich 0,38 – 0,78 μm) durchlässig ist, ist keine neue Erkenntnis. Sobald man die Kerze mit der Thermokamera am Bildschirm beobachtet verschwindet sie. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Thermokamera Strahlung im Bereich von 7,5 – 13 μm aufnimmt und normales Quarzglas über eine Dicke von einigen Millimetern undurchlässig für eine Strahlung höher als 5 μm ist und deshalb nur ein Wärmebild vom Glas zu sehen ist (vgl. Scholze, 1977, S. 192).

Bei Silizium ist das Ergebnis genau umgekehrt. Für das sichtbare Licht ist die Siliziumscheibe undurchlässig, da die Photonen hier absorbiert werden (vgl. Giancoli, 2010, S. 1393). Doch über die Thermokamera ist die Kerzenflamme zu sehen, da Silizium zwar nicht für das sichtbare Licht, dafür aber für die Wärmestrahlung im Bereich von 1 – 15 μm durchlässig ist (vgl. Moschig, 2014, S. 103).

Bemerkung:

Dass Glas undurchlässig für Strahlung oberhalb 2,5 μm ist, ist auch der Grund warum Autos, wenn sie in der Sonne stehen, im Inneren so heiß werden. Die kurzwelligen Sonnenstrahlen können durch das Glas den Innenraum aufheizen, aber die dabei entstehende langwellige Wärmestrahlung kann nicht durch das Glas hinaus. Deshalb gibt es auch verschiedene Materialien um die Transmission länger welliger Strahlung zu erhöhen. So lässt Barium Fluorid Strahlen bis 15 μm durch (vgl. Pottlacher, 2012)

15.7. Experiment 45: Feuerwerksbrille



a)

b)

Abb. 77 a, b: a) Multispektralbrille b) Bild durch Brille

Material:

- Kerze
- Feuerwerksbrille

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Dieses sehr einfache Experiment bringt eine sehr interessante Physik mit sich. Eine Kerze wird in die Hand genommen und angezündet. Wenn man jetzt die Feuerwerksbrille aufsetzt und in die Flamme blickt, dann sieht man rund um die Flamme ein Regenbogenleuchten.

Physikalische Erklärung:

Die Feuerwerksbrille, auch Multispektralbrille genannt, spaltet das einfallende Licht in seine Farben auf. Wenn man sich die transparente Folie der Brille genauer anschauen würde, dann würde man feine Rillen auf der Oberfläche erkennen. Dies nennt man auch ein optisches Gitter. Bei einer Feuerwerksbrille wurde nicht nur eines, sondern zwei solche Gitter aufeinandergelegt und diese um 90° verschoben. Da die einzelnen Farben wie wir wissen unterschiedliche Wellenlängen haben, werden diese auch unterschiedlich gebrochen, was zur Folge hat, dass wir einen Regenbogen ausmachen können. Weil sich der Vorgang überall auf der Folie wiederholt, sieht man auch mehrere Regenbögen rund um die Flamme verteilt (vgl. Mousset, 2015).

Bemerkung:

Natürlich funktioniert dieser Effekt auch bei Glühlampen, Leuchtstoffröhren oder anderen Leuchtmitteln, es werden sich nur die Farbspektren ändern.

16. Experimente zur Bewegung von Kerzenflammen

16.1. Experiment 46: Kerze mit einem Trichter anblasen



Abb. 78: Trichterströmung
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- Trichter

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zuerst stellt man eine Kerze auf einem festen Untergrund, sodass sie auch nicht umfallen kann, wenn sie angeblasen wird. Dann nimmt man sich den Trichter und hält die weite Öffnung genau mittig zur Kerzenflamme hin. Wenn man jetzt in den Trichter hinein bläst, bewegt sich die Kerzenflamme nicht nach außen, wie wir es vielleicht erwarten würden, sondern nach innen in Richtung Trichter. Würden wir den Trichterkegel soweit nach oben führen, dass die Flamme in etwa mit dem Rand des Trichters abschließt und wieder hineinblasen, so würden wir das erwartete Bild der Kerzenflamme sehen, die sich vom Trichter weg bewegt oder sogar ausgeblasen wird.

Physikalische Erklärung:

Dieser einfache Versuch birgt eine interessante Physik zur Strömungslehre. Die Bewegung der Kerzenflamme nach innen lässt sich erklären, indem wir uns die Strömungen im Trichter etwas genauer anschauen. Wenn man beim Trichter in die

schmale Öffnung hineinbläst, entstehen in der großen Kegelöffnung unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten. In der Mitte des Trichters strömt die Luft schneller als am Rand des Kegels. Die schneller strömende Luft, also ein hoher dynamischer Druck (p_{dyn}), hat zur Folge, dass der statische Druck (p_{stat}) in diesem Bereich absinkt, wodurch der äußere statische Umgebungsdruck größer ist und die Luft in Richtung Trichtermitte strömt. Dieser Effekt gilt allgemein als Bernoulli-Effekt und ist über folgende Gleichung definiert:

$$p_{ges} = p_{stat} + p_{dyn} \quad (16.1)$$

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \textit{konstant} \quad (16.2)$$

p ... Gesamtdruck
 ρ ... Dichte des Fluids
 h ... Höhe
 v ... Strömungsgeschwindigkeit
 g ... Erdbeschleunigung

Deshalb wird die Kerze, wenn man sie in Kegelmitte anbläst, nach innen gezogen und beim Kegelrand nach außen (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2015, S. 389 - 391).

16.2. Experiment 47: Luftzug bei offenen Türen

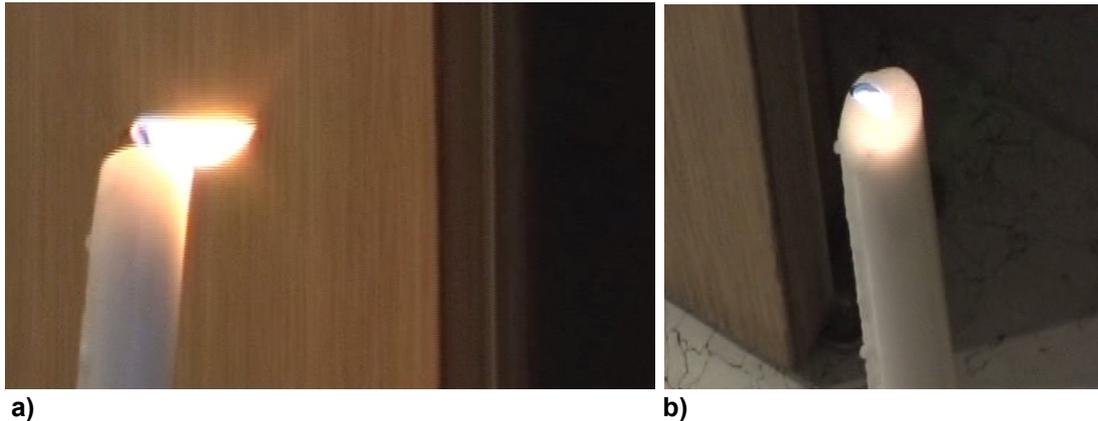


Abb. 79 a, b: Luftzug bei Türspalt a) Oberhalb b) Am Boden (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Für diesen Versuch braucht man nur eine Kerze und einen Raum, wo eine Temperaturdifferenz zu einem anderen Raum herrscht. Man zündet die Kerze an, öffnet die Tür und hält die Kerze am Boden zur Türschwelle. Die Kerze wird sich nach innen in den Raum neigen wenn es außerhalb des Raumes kälter als innerhalb ist. Nun hält man die Kerze an die Oberseite der Türschwelle und man stellt fest, dass sich die Kerze diesmal nicht nach innen sondern nach außen neigt.

Physikalische Erklärung:

In geschlossenen Räumen wird die Strömung bei Fenstern und Türen über die Durchlässigkeit D und den Exponenten n der Druckdifferenz beschrieben. Bei geöffneten Räumen wie bei einem Türspalt, kann die Durchströmung nicht durch einen gerichteten Luftstrom dargestellt werden, sondern der Spalt wird in horizontale Linien unterteilt, die jeweils separat behandelt werden. Die Temperaturunterschiede zwischen den Räumen führen zu einer Zweiwegeströmung die in Abb. 80 dargestellt ist, wobei die kältere Luft am Türspalt unten in den wärmeren Raum fließt und am oberen Ende umgekehrt. In der Mitte befindet sich eine sogenannte neutrale Zone (vgl. Zürcher & Frank, 1998, S. 79 - 80).

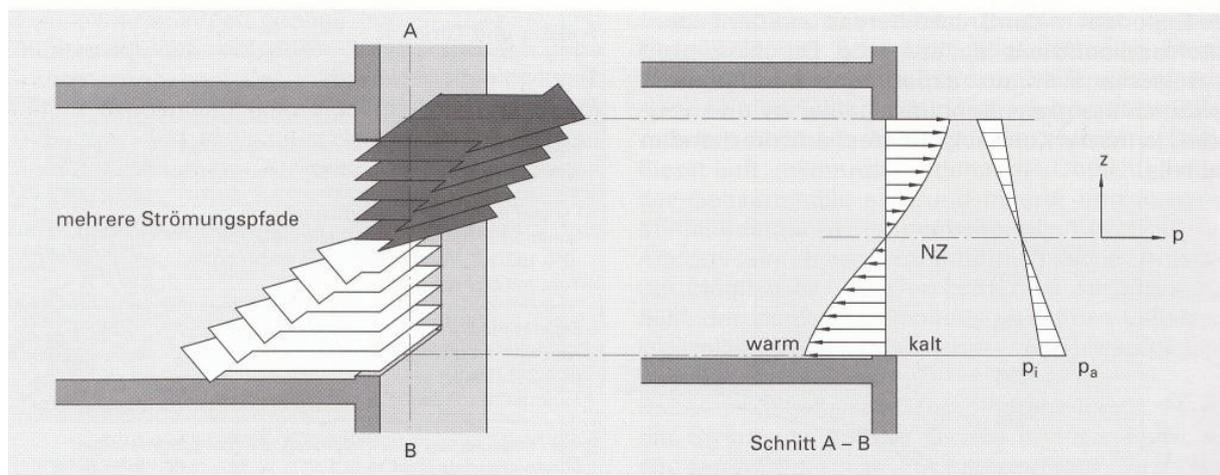


Abb. 80: Schema Luftzug bei Türspalt (Zürcher & Frank, 1998, S. 80)

Bemerkung:

Dieser Versuch fand schon viel früher Verwendung, als man versuchte in Räumen und Häusern die Orte zu finden wo ein Luftzug entsteht. Zum einen deshalb weil ein Luftzug Wärmeverlust bedeutet und eine Energieverschwendung wäre und zum anderen kann es Erkältungen fördern da der Luftzug die Schleimhäute austrocknet, was wiederum ein Einfallstor für Erkältungsviren darstellt (vgl. Drösser, 2011). Oft entsteht der Luftzug bei zu großen Türspalten oder schlecht abgedichteten Gebäuden.

16.3. Experiment 48: Der Bernoulli-Effekt mit 2 Kerzen



Abb. 81: Bernoulli Effekt
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- 2 x Kerzen
- Blasrohr

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Man stellt zwei Kerzen im Abstand von einigen Zentimetern, wie in Abb. 81 zu sehen, nebeneinander auf und zündet sie an. Wenn man jetzt mit dem Blasrohr zwischen die zwei Kerzen bläst, neigen sich die Kerzen nicht nach außen, wie man vielleicht annehmen mag, sondern nach innen was allgemein als der Bernoulli Effekt bekannt ist.

Physikalische Erklärung:

Über das Hineinblasen in das Rohr entsteht eine Luftströmung, die zwischen den zwei Kerzen hindurch strömt. Über diese Strömung und die daraus resultierende Geschwindigkeitsdifferenz mit außen entsteht ein Ort niederen statischen Drucks als der Druck außen. Deshalb strömt die Luft von außen in den Bereich zwischen den Kerzen und zieht damit die Kerzenflammen nach innen. Auf diesen Effekt, dass eine bewegte Strömung einen Ort niederen statischen Drucks nach sich zieht, kamen Daniel Bernoulli und Giovanni Battista Venturi und man nennt ihn den Bernoulli-Effekt (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2015, S. 389 - 391), siehe auch Gl. 16.2.

Bemerkung:

In der Formel-1 wird der Bernoulli-Effekt verwendet um die Bodenhaftung der Formel-1 Wagen zu erhöhen. Dazu hat jeder Formel-1 Wagen einen bestimmt geformten Spoiler auf der Rückseite, der den Effekt ausnutzt, dass sich die Luft auf der Oberseite staut und sich damit das effektive Gewicht des Wagens erhöht, was eine Verbesserung der Bodenhaftigkeit bewirkt. Ein weiterer Effekt, den ein Spoiler eines solchen Wagens ausnutzt, ist eine Verengung der Luftströmung bei daraus resultierender Strömungsgeschwindigkeitserhöhung, um eine Druckminderung an diesem Ort zu erzielen. Dieser Effekt wird auch als Venturi-Effekt bezeichnet (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2015, S. 389 - 391).



Abb. 82: Formel 1 Wagen mit Spoiler (pixabay)

16.4. Experiment 49: Tanzende Kerze vor einem Lautsprecher



Abb. 83: Kerze vor Lautsprecher

Material:

- Kerze
- Radio/Musikanlage

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Lautsprecher und Kerze werden ungefähr im Abstand wie hier in Abb. 83 aufgestellt und die Kerze angezündet. Anschließend schaltet man den Radio oder die Musikanlage ein und schaut auf die Kerze. Wenn sich die Kerze nicht im Bass bewegt, dann muss die Lautstärke oder der Bass erhöht werden. Nun wird man eine zur Musik tanzende Kerze sehen, die sogar ausgehen kann, wenn der Bass zu hoch eingestellt ist.

Physikalische Erklärung:

Die Bewegung der Kerze lässt sich sehr einfach erklären. Durch den Bass der Musik entstehen Schallwellen, sogenannte Longitudinalwellen. Diese Wellen haben Druckmaxima und Minima, welche die Kerze bewegen. Dabei kommt es aber nicht zwangsweise auf die Lautstärke an, denn die Lautstärke ist nur ein Maß wie laut etwas vom Menschen empfunden wird und entspricht einen Schalldruckpegel bei dem ein Sinuston (Einzelton) von 1000 Hz als gleich laut empfunden wird (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2015, S. 471 - 472).

In Abb. 84 sind Kurven gleicher subjektiven Lautstärkeempfindungen dargestellt in Abhängigkeit der Frequenz.

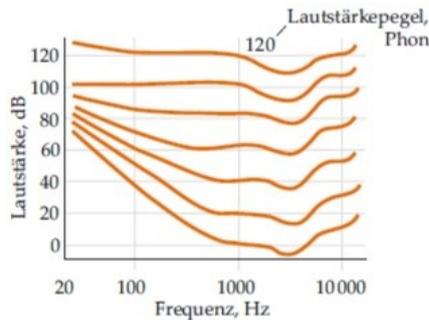


Abb. 84: Kurven gleicher Lautstärkeempfindungen als Funktion der Frequenz zur Lautstärke (Tipler, Mosca, Wagner, 2015, S. 472)

Aus den Kurven kann man herauslesen, dass bei einer Frequenz von 1000 Hz der Lautstärkepegel angegeben in Phon gleich der Lautstärke in Dezibel [dB] ist. Die unterste Kurve umfasst dabei die Hörschwelle mit 0 Phon und die oberste Kurve die Schmerzschwelle bei 120 Phon. Man kann auch sehen, dass die Frequenzen unter 1000 Hz eine größere Intensität fordern, um noch wahrgenommen zu werden, als über 1000 Hz.

Bemerkung:

Um eine Übersicht verschiedener Intensitäten I zu geben, sieht man folgend eine Liste von verschiedenen Schallquellen und ihre dazugehörigen relativen Intensitäten $[I/I_0]$. Dabei wird I_0 durch die Hörschwelle ($I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$) definiert. Die jeweiligen Schallintensitätspegel werden in Dezibel [dB] angegeben.

Tabelle 1: Relative Intensitäten und Schallintensitätspegel einiger Schallquellen (Tipler, Mosca, Wagner, 2015, S. 473)

Schallquelle	I/I_0	dB	Beschreibung
	10^0	0	Hörschwelle
Normales Atmen	10^1	10	Kaum hörbar
Rascheln Blätter	10^2	20	
Leises Flüstern (5 m entfernt)	10^3	30	Sehr leise
Bibliothek	10^4	40	
Ruhiges Büro	10^5	50	Leise
Normale Unterhaltung (1 m entfernt)	10^6	60	
Regler Verkehr	10^7	70	
Bürolärm mit Maschinen, mittlerer Fabriklärm	10^8	80	
Schwertransporter (15 m entfernt), Niagara-Wasserfälle	10^9	90	Dauerbelastung führt zu Hörschäden
Alte U-Bahn	10^{10}	100	
Baulärm (3 m entfernt)	10^{11}	110	
Rockkonzert mit Verstärker (2 m entfernt), Starten eines Düsenflugzeugs (60 m entfernt)	10^{12}	120	Schmerzgrenze
Presslufthammer, Maschinengewehrfeuer	10^{13}	130	
Starten eines Düsenflugzeugs (unmittelbare Nähe)	10^{15}	150	
Großes Raketentriebwerk (unmittelbare Nähe)	10^{18}	180	

16.5. Experiment 50: Elektrischer Wind

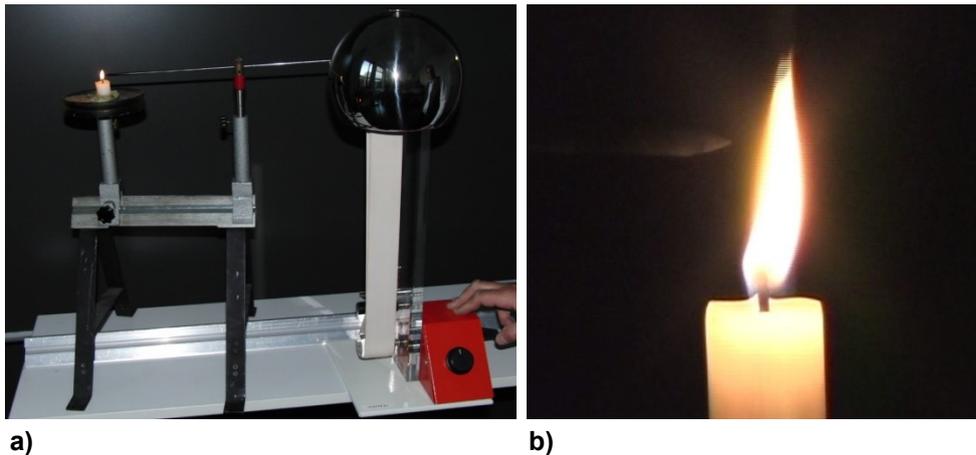


Abb. 85 a, b: Elektrischer Wind a) Versuchsaufbau b) Neigung der Kerze

Material:

- Hochspannungsgenerator (Van de Graaf Generator)
- Metallspitze
- Kerze

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Ein „Van de Graaf“ Hochspannungsgenerator wird mit einer Metallspitze verbunden. Die Kerze wird so aufgestellt, dass wenn man die Kerze anzündet, die Mitte der Flamme auf gleicher Höhe wie die Metallspitze ist. Der Abstand zwischen Metallspitze und Kerze sollte auch nicht mehr als 1 cm betragen. Wenn man jetzt eine Hochspannung anlegt, so kann man feststellen, dass die Kerze sich von der Metallspitze weg neigt (Abb. 85 b).

Physikalische Erklärung:

Legt man eine Hochspannung an eine Metallspitze an, so entsteht unmittelbar oberhalb der Metallspitze eine sehr hohe elektrische Feldstärke. Die Elektronen werden je nach Polarität angezogen oder abgestoßen. Durch diese Bewegung kommt es zu einer weiteren Stoßionisation der Elektronen durch die umgebenden Atome. Hauptsächlich über die massereichen Ionen werden auch Gasmoleküle mitgerissen, die dann den sogenannten elektrischen Wind auslösen, was die Neigung der Kerze erklärt und diese sogar bei ausreichend hoch angelegter Spannung ausblasen kann (vgl. Riecke, 2015, S. 378).

Bemerkung:

Für diesen Versuch wurde für den Hochspannungsgenerator ein Van der Graaf Generator genommen. Dieser funktioniert über ein isoliertes umlaufendes Band auf dem über scharfe Spitzen Ladungen aufgesprüht werden, die dann über das Band ins Innere einer leitenden Kugel mitgenommen werden. Über einen Leiterkamm, der mit der Kugel leitend verbunden ist, wird die Ladung wieder abgenommen. Die Ladungen werden aufgrund nachkommender gleichpoliger Ladungen nach außen gedrängt sodass es innerhalb der Kugel feldfrei bleibt. So werden schon mit einfachen Geräten Spannungen von über 10^5 V erreicht (vgl. Demtröder, 2013, S. 19).

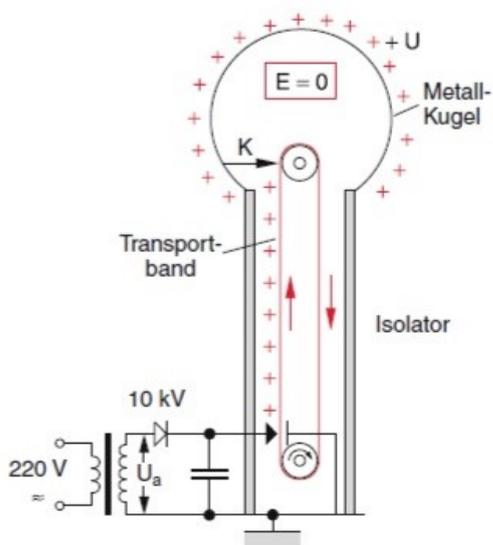


Abb. 86: Schema Van de Graaf Generator (Demtröder, 2013, S.19)

16.6. Experiment 51: Kerze zwischen Plattenkondensator 1

Material:

- Kerze
- Plattenkondensator
- Elektroskop
- Kunststoffstab
- Tierfell

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zuerst werden an dem Kunststoffstab Ladungen angebracht indem man in diesem Beispiel mit dem Tierfell an dem Kunststoffstab reibt und so die negativen Ladungen am Fell auf den Kunststoffstab überträgt. Daraus resultiert eine Ladungstrennung. Das Tierfell hat jetzt einen Überschuss an positiven Ladungen und der Kunststoffstab einen Überschuss an negativen Ladungen. Nun berührt man mit dem Kunststoffstab eine Seite des Plattenkondensators, welcher mit einem Elektroskop zusammengeschlossen ist und sieht bei diesem einen Ausschlag. Dies bedeutet, dass wir jetzt Ladungen auf den Plattenkondensator angebracht haben. Jetzt wird die Kerze angezündet und zwischen die zwei Platten des Kondensators gehalten. Man kann beobachten, dass der Ausschlag des Elektrometers auf 0 fällt.

Physikalische Erklärung:

Wie bereits erwähnt, verhält sich die Kerzenflamme wie ein Plasma. Dies bedeutet, es befinden sich in der Flamme negativ geladene Elektronen und positiv geladene Ionen. Durch das Einbringen der Kerze zwischen die aufgeladenen Platten des Kondensators werden die frei beweglichen Elektronen auf die positive Platte gezogen und es findet somit ein Ladungsausgleich statt. Diesen Ausgleich kann man mit einem Elektroskop darstellen.

Bemerkung:

Ein Elektroskop dient dem Nachweis von elektrischen Ladungen und Spannungen. Die Funktionsweise eines Elektroskops beruht darauf, dass sich gleichnamige Ladungen abstoßen und ungleichnamige anziehen. Diese Abstoßung zwischen

gleichnamigen Ladungen macht man sich zunutze, indem man positive oder negative Ladungen an dem Elektroskop anbringt, wie im oben genannten Beispiel, wo wir negative Ladungen mittels eines Kunststoffstabs angebracht haben. Diese Ladungen verteilen sich über dem Elektroskop und bewirken somit eine Abstoßung zwischen dem Zeiger und dem Metall. In unserem Fall haben wir ein Braun'sches Elektroskop (Abb. 87) mit einem leichten, auf Nadelspitzen gelagerten Zeiger verwendet. Dieser schlägt vertikal im ungeladenen Zustand und weiter Richtung horizontal aus, je mehr gleichnamige Ladung man anbringt (vgl. Ryder, 2004).



Abb. 87: Elektroskop
(http://www.lehrmittel-shop.de/cornelsen_experimentam:104/elektroskop_nach_braun_anzeigegeraet_fuer_versuche_zur_elektrostatik-39984.html)

16.7. Experiment 52: Kerze zwischen Plattenkondensator 2 (bewegte Flamme)

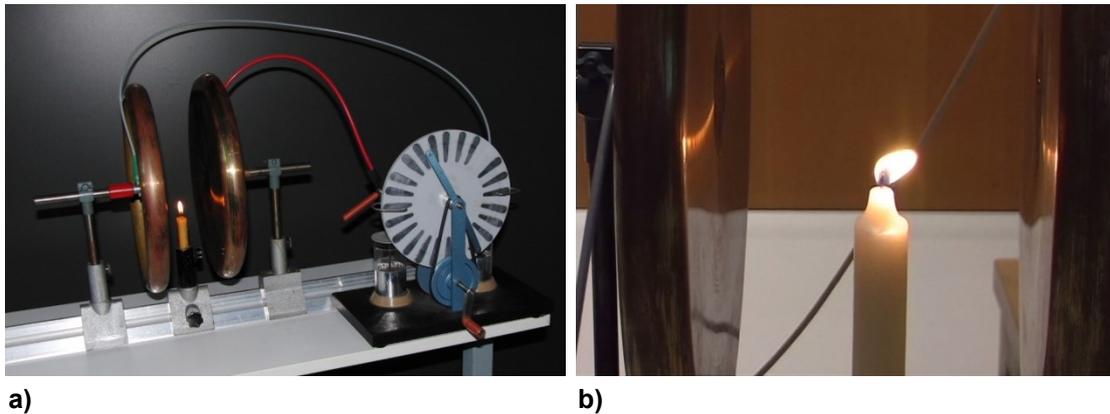


Abb. 88 a, b: Kerze im Plattenkondensator a) Versuchsaufbau b) Neigung der Kerze

Material:

- Kerze
- Plattenkondensator
- Influenzmaschine
- Verbindungskabel

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Eine Kerze wird im Plattenkondensator platziert und angezündet. Nun ladet man den Kondensator mit der Influenzmaschine auf einige 1000 Volt auf und kann beobachten, dass sich die Flamme in Richtung der negativ geladenen Kondensatorplatte neigt.

Physikalische Erklärung:

Wie in Experiment 51 beschrieben ist die Kerzenflamme ein Plasma mit frei beweglichen negativen Elektronen und positiv geladenen Ionen. Wenn man nun eine sehr hohe Spannung an den Plattenkondensator anhängt, so werden wie in die frei beweglichen Elektronen des Plasmas auf die positive Platte gezogen und somit bleiben in der Flamme nur mehr positiv geladenen Ionen. Diese werden anschließend zur negativen Platte gezogen, welche eine Auslenkung der Kerzenflamme in Richtung der negativen Platte bewirkt.

Bemerkung:

Als Kondensator bezeichnet man eine Anordnung mit zwei Leitern, die eine gleich große, aber entgegengesetzte Ladung tragen. Die Ladung eines Kondensators erfolgt üblicherweise so, dass eine Ladung Q zum anderen Leiter übertragen wird, sodass eine Seite die Ladung $+Q$ und die andere Seite $-Q$ besitzt. Die Kapazität eines Kondensators ergibt sich aus:

$$C = \frac{Q}{U} \quad \begin{array}{l} C \dots \text{Kapazität [F]} \\ Q \dots \text{Ladung [C]} \\ U \dots \text{Spannung [V]} \end{array} \quad (16.1)$$

Eine bestimmte Form des Kondensators ist der Plattenkondensator, welcher aus zwei parallel leitenden Platten besteht. Im alltäglichen Gebrauch bestehen diese Platten meist aus einer dünnen Metallfolie. Diese Platten werden von einer Kunststoffschicht getrennt und sind meistens zu einem Zylinder aufgerollt, um möglichst viel Fläche auf kleinen Raum zu bekommen. Eine Platte wird mit einer $+Q$ Ladung geladen und die andere mit einer $-Q$ Ladung. Da die Ladungen entgegengesetzt sind, ziehen sie sich an und verteilen sich homogen auf deren Innenseiten. Weil die Platten nur einen geringen Abstand voneinander aufweisen, ist das elektrische Feld zwischen ihnen ein homogenes Feld. Somit ergibt sich eine neue Gleichung für die Kapazität mit:

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad \begin{array}{l} C \dots \text{Kapazität [F]} \\ \epsilon_0 \dots \text{elektrische Feldkonstante,} \\ \epsilon_0 = 8.854187 \dots \cdot 10^{-12} \text{ [As/V}\cdot\text{m]} \\ A \dots \text{Fläche der Platten [m}^2\text{]} \\ d \dots \text{Abstand der Platten [m]} \end{array} \quad (16.2)$$

Mit dieser Formel kann man gut darstellen, dass die Kapazität proportional zur Fläche der Platten wirkt sowie umgekehrt proportional zu ihrem Abstand (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2015, S. 763).

16.8. Experiment 53: Zentripetalkraft am Drehschemel



Abb. 89: Kerze am Drehschemel

Material:

- Kerze
- Drehschemel
- Glasgefäß (Kerze muss hinein passen)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Eine Kerze im Glasgefäß wird am Rand des Drehschemels befestigt. Das Glasgefäß, in dem die Kerze steht, wird benötigt, damit die Kerze vom Zugwind nicht beeinflusst wird. Wenn man nun den Drehschemel zum Rotieren bringt kann man feststellen, dass sich die Kerze nicht nach außen, sondern nach innen neigt.

Physikalische Erklärung:

Auf die drehende Kerze und die dadurch mitbewegten Gase wirken Schwerkraft und Zentrifugalkraft und die Auftriebskraft entgegen der resultierenden aus den beiden. Aufgrund der Zentrifugalkraft wandern die kühleren und deshalb schwereren Umgebungsgase nach außen von der Drehachse weg. Die warmen Verbrennungsgase, welche entstehen sind leichter und wandern deshalb in Richtung Drehachse. Deshalb neigt sich die Flamme der Kerze während der Drehung nach innen (vgl. LEIFIPhysik, 2001).

Bemerkung

Dieses Experiment trägt die Bezeichnung Zentripetalkraft in sich, da sich die Flamme der Kerze bei Drehung immer in Richtung Drehachse neigt. Dies entspricht genau der Krafrichtung der Zentripetalkraft. Die in entgegengesetzter Richtung gleich große Kraft nennt man Zentrifugalkraft. Diese Kraft ist eine Scheinkraft die nur Beobachter im rotierenden Bezugssystem erfahren können und diese auch beschreiben können (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2015, S. 96 - 127).

16.9. Experiment 54: Kerzenwippe



Abb. 90: Kerzenwippe
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- Messer
- 10 cm Draht
- 2 x einfache Messbecher

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Damit der Docht für die Kerzenwippe an jedem Ende genau gleich weit hervorsteht, schneidet man das Wachs am Ende der Kerze, wo kein Docht ist ab und lässt den Docht ungefähr gleich weit herausstehen. Jetzt misst man die Mitte der Kerze aus, und treibt den Draht genau mittig durch die Kerze, dass an beiden Seiten der Kerze gleich viel Draht hervorsteht. Nun legt man die Kerze mit dem Draht so auf den Messbecher, dass der Draht in den beiden Ausbildungen des Gefäßes liegen bleibt. Die Kerze müsste jetzt waagrecht liegen bleiben, wenn man die Mitte der Kerze mit dem Draht erwischt hat. Wenn man jetzt die beiden Enden der Kerze anzündet, wird man feststellen, dass die Kerze langsam und mit zunehmender Stärke zu wippen beginnt.

Physikalische Erklärung:

Wenn man die Kerze an beiden Enden anzündet wird das Wachs flüssig. Der Teil, welcher nicht verbrennt, tropft in unregelmäßigen Abständen nach unten. Da die Kerze an beiden Enden abtropft, fängt die Kerze leicht zu wippen an. Sobald das eine Ende nach unten wippt kann mehr flüssiges Wachs runter tropfen. Dies hat zur Folge hat, dass dieses Ende wieder leichter wird und somit nach oben geht und die andere Seite nach unten geht. Dieses Wechselspiel der wippenden Kerze wiederholt sich so lange, bis kein Wachs mehr vorhanden ist.

Bemerkung:

Dieses Experiment würde natürlich auch mit einer sehr großen Kerze funktionieren. Es würde lediglich länger dauern bis die Kerze zu wippen beginnt, dafür würde sie aber mit viel größerer Amplitude schwingen als die kleine Kerze.

16.10. Experiment 55: Tiefdruckgebiet mit Kerzen



Abb. 91: Kerzenkranz als Tiefdruckgebiet
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Holzring
- 80 Kerzen

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Als erstes werden alle Kerzen auf dem Holzring platziert und fixiert. Dies gelingt am besten, wenn man den Kerzenstumpf aufschmilzt und danach auf den Ring setzt. Anschließend zündet man alle Kerzen an und wartet kurze Zeit. Bei näherem Betrachten der Kerzenflammen wird man beobachten, dass alle Kerzen sich leicht nach innen neigen.

Physikalische Erklärung:

Dem liegt dasselbe Phänomen zu Grunde, welches für die Form der Flamme verantwortlich ist, nämlich die Konvektion (Experiment 12). Durch die warme aufsteigende Luft über den Kerzen, entsteht bodennah ein Unterdruck, welcher dazu führt, dass die umliegende Luft von Gebieten höheren, zu Gebieten niedrigeren Drucks fließt. Die dadurch einsetzende leichte Strömung in Richtung des Mittelpunkts des Ringes, bewirkt eine Ablenkung der Kerzenflammen nach innen.

Bemerkung:

Dieses Experiment veranschaulicht ein in der Natur vorkommendes Wetterphänomen, nämlich das Tiefdruckgebiet. Es ist in guter Näherung ein Modell für ein Wettergeschehen, welches uns aus dem Alltag bekannt ist. Das sogenannte Hitzetief entsteht meist bei sehr stabiler Hochdruckwetterlage. In den Alpen kommt dieses markante Phänomen aufgrund der stärkeren Sonneneinstrahlung an den Hängen vor. Diese ist am umliegenden Flachland etwas schwächer. Durch die warme aufsteigende Luft entsteht ein Unterdruck, welcher eine Ausgleichsströmung aus den darum liegenden Tälern oder Becken nach sich zieht, den sogenannten Talwind. Dieser muss vor allem von Segelfliegern oder Paragleitern beachtet werden, da dieser teils recht stark und damit gefährlich wird, was oft zur unfreiwilligen Landung führt (vgl. Frey, 2015, S. 20). Wichtig für die Durchführung des Versuchs ist es, einen windschwachen Ort auszuwählen um etwaigen Turbulenzen vorzubeugen, welche die Kerzenflammen unruhig flackern lassen würden.

16.11. Experiment 56: Rubens'sches Flammenrohr



Abb. 92: Aufbau Rubensrohr (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Rohr mit Löchern in gleichmäßigen Abständen, ein Ende mit einer Membran und das andere mit einem Einlassventil für das Gas (Rubensrohr)
- Gasflasche (Propangas)
- Bunsenbrenner
- Sinusgenerator

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Das Experiment wird aufgebaut, indem man das Rubensrohr auf einem Tisch platziert, die Gasflasche mit dem Propangas an einer Seite anschließt und am anderen Ende den Lautsprecher platziert, der mit einem Sinusgenerator angeschlossen ist. Das Ventil zur Gaszufuhr wird aufgedreht und mit Hilfe eines Bunsenbrenners werden die Auslasslöcher am Rohr angezündet. Jetzt sollte über jeder Öffnung eine Flamme in gleicher Höhe brennen, wenn der Sinusgenerator noch kein Signal ausgibt. Wenn jetzt ein bestimmter Ton vom Sinusgenerator angelegt wird, kann man über den Flammen eine stehende Welle darstellen.

Physikalische Erklärung:

Bei einer bestimmten Frequenz bildet sich im Rohr eine stehende Schallwelle aus. Eine stehende Welle entsteht bei geeigneter Überlagerung von Wellen und es bildet sich ein stationäres Schwingungsmuster aus. Das heißt, die Maxima (Bäuche) und Minima (Knoten) bleiben bei der stehenden Welle ortsfest (vgl. Demtröder, 2008, S. 396)

Bei den Druckmaxima (Bäuche) strömt mehr Gas durch die Löcher und somit steht die Flamme hier am höchsten. Bei den Druckminima (Knoten) ist das Gegenteil der Fall und die Flammen sind hier am niedrigsten. So kann man über den Flammen eine schöne stehende Welle zeigen, wie hier in Abb. 93 dargestellt.

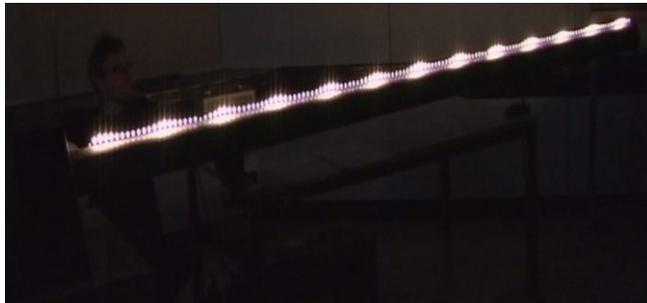


Abb. 93: Stehende Welle am Rubensrohr (Weihnachtsvorlesung 2012)

Bemerkung:

Eine weitere Möglichkeit um eine stehende Welle zu zeigen, wäre über das Kundt'sche Rohr. Dazu wird in einer Glasröhre Korkpulver gleichmäßig über den Boden verteilt. Als Schwingungsgeber dient ein Metallstab, der in der Mitte eingespannt ist und durch einen Piezozylinder zur Eigenschwingung gebracht wird. Eine frei schwingende Platte ist am anderen Ende des Stabes angebracht und überträgt die Schwingung auf das Gas im Inneren der Röhre. Bei richtigem Abstand d wie es in Abb. 94 zu sehen ist und wenn das andere Ende der Röhre verschlossen ist, entsteht eine stehende Welle. Bei dieser wird an den Wellenmaxima das Korkmehl weggeschleudert, welches dann bei den Knoten liegen bleibt. Aus dem Abstand von einem Knoten zum übernächsten lässt sich so die Wellenlänge bestimmen und darüber hinaus die Schallgeschwindigkeit im Gas (vgl. Demtröder, 2008, S. 398).

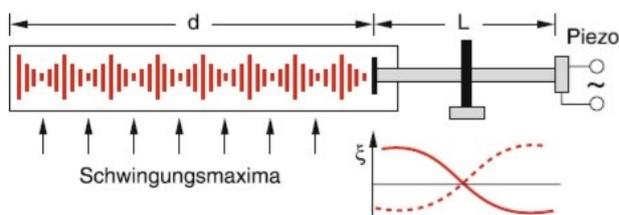


Abb. 94: Kundtsche Rohr (Demtröder, 2008, S. 398)

17. Explosive Experimente

17.1. Experiment 57: Kerzen durch Brett

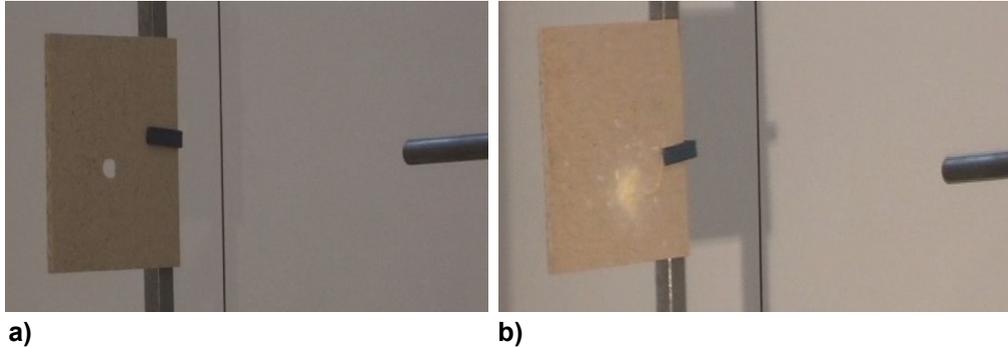


Abb. 95 a, b: Schuss einer Kerze a) Gefrorene Kerze b) Tiefgefrorene Kerze (-196 °C) (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerzen (1 x normal, 1 x Gefrierschrank gefroren, 1 x tiefgekühlt mit flüssigem Stickstoff)
- Abschussrohr
- Gasflasche (Pressluft 200 bar)
- Holzbretter (1 x 5 mm Dicke, 1 x 10 mm Dicke)
- 2 x Stative (mit Schraubklemmen zur Befestigung der Bretter)
- Handtücher

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die Kerze, die vom Gefrierschrank kommt, muss schon einige Zeit früher vorbereitet werden, weil die Kerze sonst nicht gefriert. Anders bei der mit flüssigem Stickstoff gekühlten Kerze die auch knapp vor dem Versuch tiefgekühlt werden kann. Das dünnere Holzbrett wird mit den Stativen in einer Höhe positioniert, sodass man den Versuch gut überblicken kann. Des Weiteren muss hinter dem Brett zur Sicherheit ein Handtuch aufgehängt werden, damit das Geschoss nicht irgendwo birst und damit irgendjemanden verletzen könnte. Das Abschussrohr wird mit der Gasflasche zusammengeschlossen und die erste, nicht behandelte Kerze, wird in das Rohr gegeben. Wenn jetzt das Ventil der Gasflasche aufgedreht wird, sollte die Kerze so stark beschleunigt werden, dass sie durch das Brett fliegt und im Handtuch

aufgefangen wird, ohne dass die Kerze in ihre Einzelteile zerbrochen ist. Dieser Vorgang wird mit dem dickeren Holzbrett wiederholt, nur wird diesmal die im Gefrierschrank gefrorene Kerze verwendet. Wie man sehen wird, fliegt diese Kerze ohne Probleme durch das Holzbrett. Bei der letzten Kerze, die tiefgefrorene mit flüssigem Stickstoff wird man sehen, dass diese nicht durch das Holz fliegt sondern zu einem Staubklumpen am Brett wird.

Physikalische Erklärung:

Dieses Experiment birgt keine Zauberei, sondern lässt sich daraus erklären, dass es beim Auftreffen der Kerze auf das Holzbrett zu einer großen Kraftübertragung auf eine sehr kleine Fläche kommt. Doch aufgrund der kurzen Zeitdauer des Impakts kommt es zu keinem signifikanten Wärmefluss, welcher das Wachs aufweichen könnte und somit keine Perforation stattfinden würde. Ob das Holzbrett durchlöchert wird, ist rein eine Frage der Massen- und Energiedichten und somit könnte man mit der entsprechenden Vorrichtung auch durch eine Klassenwand schießen. Bei der mit flüssigem Stickstoff gefrorenen Kerze wird das Wachs zu spröde um durch das Brett zu kommen und birst deshalb an der Holzoberfläche ohne einen Schaden anzurichten (vgl. Kressierer, 2011).

Bemerkung:

Ein weitaus größerer Effekt zu diesem Experiment lässt sich in der Natur beobachten. Eine der extremsten Wettererscheinungen ist der Tornado der Windgeschwindigkeiten bis 800 km/h erreichen kann. Ein Strohhalm kann bei diesen Geschwindigkeiten zu einem Projektil werden und Holzbretter durchschlagen (Zürcher, Neue Zürcher Zeitung, 2008).



Abb. 96: Tornado (<http://www.naklar-magazin.de/natur/umwelt/artikel/items/faszinierende-naturgewalt-tornado.html>)

17.2. Experiment 58: Wachsflammenwerfer

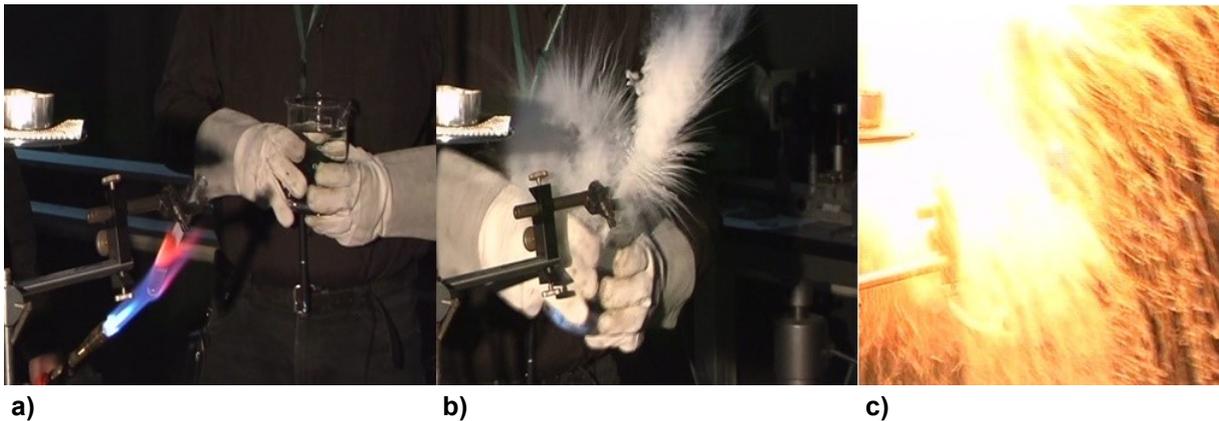


Abb. 97 a, b, c: Wachsflammenwerfer a) Aufheizen des Wachses b) Reaktion mit Wasser c) Feuerwolke (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Eprovette
- Bunsenbrenner
- Paraffinstückchen
- Gefäß mit Wasser
- Stativmaterial
- Handschuhe
- Gesichtsschutz
- CO₂ Feuerlöscher

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Wie in Abb. 97 ersichtlich, wird eine Eprovette mittels Stativmaterial so fixiert, dass die Öffnung nach schräg oben zeigt. In diese werden kleine Paraffinstückchen gegeben. Die Füllmenge bestimmt mitunter die Größe der Stichflamme. Bei diesem Experiment wurde die Eprovette ungefähr drei bis vier Zentimeter hoch befüllt. Anschließend wird das Wachs erhitzt, bis es letztendlich siedet und verdampft. Auch die Siedezeit hat Einfluss auf den Effekt. Ist das Wachs ausreichend heiß, führt man ein Glasgefäß mit kaltem Wasser zur Eprovette und taucht sie ein. Es entwickelt sich eine große Stichflamme welche aus der Eprovette schießt. Diese geht zudem noch zu Bruch.

Physikalische Erklärung:

Die Stichflamme setzt sich aus weißem Wachsdampf, welcher in einen Feuerball übergeht, zusammen. Das Wachs besteht aus langkettigen Molekülen, welche beim Erhitzen gespalten werden. Dies führt dazu, dass sich unter anderem Wasserstoffradikale bilden. Taucht man die sehr heiße Epruvette ins Wasser, kühlt diese dabei sprunghaft ab und zerspringt. Dadurch geraten das heiße Wachs und das Wasser in Verbindung, was ein sofortiges Verdampfen des Wassers zur Folge hat. Dieser Wasserdampf treibt das Gemisch nach vorne aus. Durch das Anreichern mit Luft aus der Umgebung, entzünden sich so die Wasserstoffradikale und reagieren mit dem Sauerstoff zu Wasser, was eine Flamme zur Folge hat. Weiters wird der Wachsdampf von dieser Flamme entzündet. Die beiden Vorgänge zusammen ergeben diese Flamme, welche jener von Flammenwerfern ähnelt (vgl. Lange, 2016).

Bemerkung:

Um Flammenbildung für die Zuseher besser sichtbar zu machen, empfiehlt es sich den Raum zu verdunkeln.

Sicherheitshinweis:

Dieses Experiment sollte ausschließlich von erfahrenen Fachkräften durchgeführt werden. Zur persönlichen Sicherheitsausrüstung gehören zum einen, feuerfeste Handschuhe und zum anderen eine Schutzbrille. Weiter muss ein CO₂ Feuerlöscher bereit stehen um eventuell entstehende Brände löschen zu können. Außerdem muss die Öffnung der Epruvette vom Publikum wegzeigen und ausreichend Sicherheitsabstand vorhanden sein. Ebenso empfiehlt es sich, das Experiment in Laborräumen durchzuführen. Es ist keineswegs als Hausexperiment geeignet!!

17.3. Experiment 59: Implodierende Getränkedose

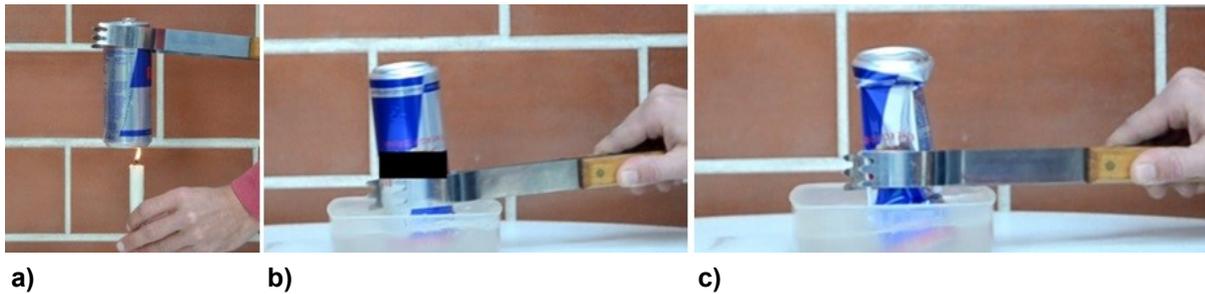


Abb. 98 a, b, c: Implodierende Getränkedose a) Aufheizen der Dose b) Überkippen ins kalte Wasser c) Zerdrückte Dose

Material

- Kerze
- Leere Getränkedose
- Behälter mit Wasser
- Zange

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Dieses Experiment zeigt auf beeindruckende Weise die Stärke des Luftdrucks. Dazu stellt man den mit Wasser gefüllten Behälter bereit und zündet die Kerze an. Nun füllt man die Dose ungefähr 1 cm mit Wasser und hält diese dann mit einer Zange über die Flamme (mit einem Bunsenbrenner würde das Experiment schneller funktionieren). Man wartet bis das Wasser in der Dose zu sieden beginnt und Wasserdampf aus der Dose aufsteigt. Danach stülpt man sie schnell kopfüber in den vorbereiteten Behälter und sie wird sich augenblicklich zusammenziehen.

Physikalische Erklärung:

Beim Erhitzen der Dose entsteht Wasserdampf und dieser verdrängt die Luft im Inneren der Dose. Wenn jetzt die Dose kopfüber ins kalte Wasser gehalten wird, kondensiert der Wasserdampf und es entsteht ein Vakuum im Inneren. Da jetzt der Luftdruck in der Umgebung viel stärker ist, zerdrückt er die Dose augenblicklich.

Bemerkung:

Bei diesem Experiment muss man wirklich so lange warten, bis der Wasserdampf aus der Dose kommt, weil sonst das Experiment misslingen kann. Beim Erhitzen entsteht zwar auch Wärme, die das Innere der Dose aufheizt und somit die Luft ihr Volumen vergrößert und später beim Abkühlen wieder verkleinert, aber dies reicht nicht um die Dose komplett zusammenzudrücken.

17.4. Experiment 60: Staubexplosion mit Lycopodium

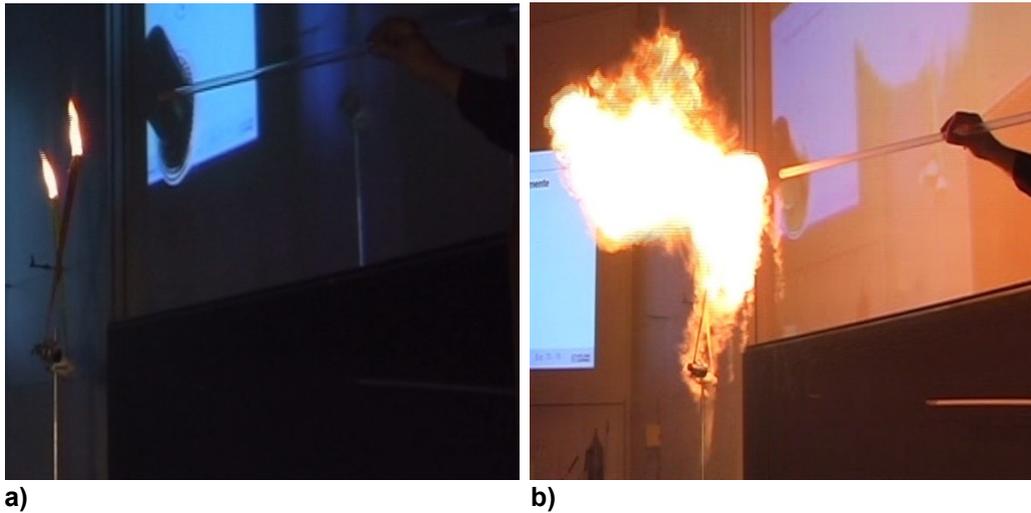


Abb. 99 a, b: a) Brennende Fackel b) Lycopodium Flamme (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- Stativ
- Glasröhre
- Lycopodium Pulver (Zwei Esslöffel)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Für dieses Experiment empfiehlt es sich, die Kerze auf einem Stativ zu befestigen, um eine schönere Demonstration und Vermeidung von ungewollten Bränden zu gewährleisten. Nachdem die Kerze angezündet wurde, gibt man das Lycopodium Pulver so in die Glasröhre, dass der ganze Durchmesser der Glasröhre damit gefüllt ist. Nun muss man aufpassen, dass das Pulver in der Röhre bleibt, während man das eine Ende zum Mund führt und mit dem anderen auf die Kerze zeigt. Jetzt noch kräftig hineinpusten und sobald das Pulver auf die Flamme trifft entsteht ein riesiger Feuerball.

Physikalische Erklärung:

Nicht so eindrucksvoll, wäre dieses Experiment auch mit Mehl oder Kaffeeweißer durchführbar, denn für eine Staubexplosion braucht es vor allem drei Dinge, damit das Experiment funktioniert. Durch Hineinpusten in die Glasröhre verteilt sich das Pulver in der Luft, was ein wesentlicher Bestandteil ist, da sich durch die feine

Verteilung der Staub viel besser entzünden lässt. Außerdem muss in der Umgebung, in welcher das Experiment stattfindet, Sauerstoff enthalten sein, was wir in der Luft zur Genüge haben und drittens muss die Zündtemperatur erreicht werden. Beim Mehl liegt diese sehr viel höher als beim Lycopodium Pulver, was es viel schwieriger macht, dies zu entzünden. Das Lycopodium Pulver eignet sich daher sehr gut für dieses Experiment da im Pulver Öle enthalten sind, welche das Ganze noch stärker brennbar machen (vgl. Bartknecht, 1987, S. 53 - 55).

Bemerkung:

Auch im pyrotechnischen Bereich findet Lycopodium Pulver Verwendung, wie zum Beispiel bei Feuerspuckern. Die Feuerspucker verbrennen sich deshalb nicht den Mund, weil sie dies zu Nutzen machen, dass Staub erst bei feiner Zerstäubung brennt. Beim Ausspucken zerstäuben sie das Pulver, das sie im Mund hatten und wenn sie dabei gleichzeitig eine Fackel zum Mund führen verbrennt dieser Staub und ein Feuerball entsteht in der Luft. Bei Anfänger kommt hauptsächlich Pulver infrage, da Pulver leichter zu zerstäuben ist wie Gel. Um trotzdem vor der Hitze und eventuellen Verbrennungen geschützt zu sein, spülen Feuerspucker vor ihrem Auftritt ihren Mund mit Milch oder ähnlichem aus, damit sich ein Fettfilm auf den Schleimhäuten bilden kann, der sie schützt (vgl. Fritz, et al., 2009, S. 251).



Abb. 100: Feuerspucker
(pixabay)

17.5. Experiment 61: Haarsprayflammenwerfer



Abb. 101: Flammenwerfer mit Haarspray (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- Haarspray (mit brennbarem Treibgas)
- Haarspray (mit unbrennbarem Treibgas)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Eine Kerze wird auf einem Tisch platziert und angezündet, sodass kein brennbares Material in der Nähe der Kerze liegt. Wenn man jetzt mit einem Haarspray auf die Flamme der Kerze sprüht, entzünden sich die Treibgase vom Haarspray und man hat einen sogenannten Flammenwerfer.

Physikalische Erklärung:

Beim Hantieren mit Haarsprays und offenen Flammen sollte man besondere Vorsicht walten lassen, denn die Spraydosen stehen unter hohem Druck und die darin enthaltenen Treibmittel sind brennbar. Wenn man die Dose selbst anzünden würde, dann würde sich das Gas im Inneren erwärmen und ausdehnen was den Druck drastisch erhöhen kann. Dies kann zur Explosion der Flasche führen. Das Treibmittel ist ein Gas, das sich unter Druck verflüssigt und sich mit den im Haarspray enthaltenen Substanzen, mischt. Des Weiteren sind in einem Haarspray noch Alkohol, Lösungsmittel, Duftstoffe, Weichmacher und andere Zusatzstoffe enthalten, die durch ein Steigrohr nach oben kommen und vom Ventil fein zerteilt werden.

Wenn die Mischung an die Luft kommt, steht sie nicht mehr unter Druck und verdampft sofort. Dies hat zur Folge, dass sich die Lacktröpfchen zerstäuben und verteilen. Diese lassen sich leicht mit dem Alkohol und dem Treibgas entzünden, was eine riesige Flamme zur Folge hat, welche erst erlischt, wenn die Zufuhr der Mischung gestoppt wird. Als Treibgase werden hauptsächlich Butan, Propan oder Dimethylether verwendet, welche alle brennbar sind (vgl. Diekmann, Jany, Thoben, Lück, 2005, S. 110).

Bemerkung:

Neueste Haarsprays verwenden als Treibmittel Stickstoff, der nicht brennbar ist und somit die Gefahr verringert, dass man sich beim Hantieren mit der Spraydose Verbrennungen zufügt (vgl. Diekmann, Jany, Thoben, Lück, 2005, S. 110).

Man könnte sogar mit einem aus Stickstoff als Treibgas basierendem Haarspray eine Kerze auslöschten. Vorsicht ist aber auch bei dieser Art von Haarspray geboten, denn auch sie steht unter Druck und kann somit unter Einfluss von Hitze explodieren. In Abb. 102 ist ein Haarspray mit Stickstoff als Treibgas zu sehen, mit dem man Kerzen auslöschten kann.



Abb. 102: Aus Stickstoff basierender Haarspray (Weihnachtsvorlesung 2012)

17.6. Experiment 62: Benzinbrandkerze

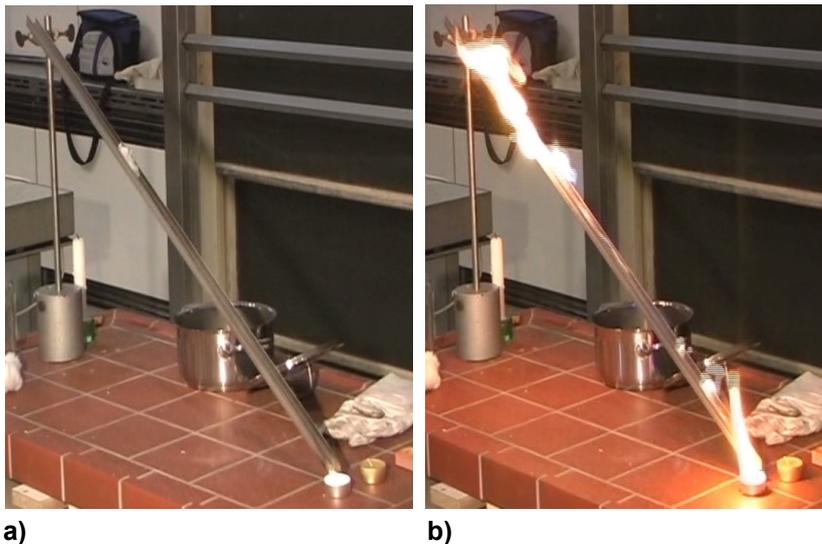


Abb. 103 a, b: Benzinbrandkerze a) Aufbau b) Benzinbrand (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze (Teelicht)
- Benzin
- Watte
- Rinne
- Stativ

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die Rinne wird so an einem Stativ befestigt wie, es in Abb. 103 a zu sehen ist. Darunter wird eine Kerze aufgestellt und angezündet. Man muss aufpassen, dass das Ende der Rinne genau zur Flamme verläuft, weil sonst das Experiment nicht funktioniert. Die Watte wird in Benzin getränkt, aber nicht so viel, dass Benzin vom Wattebausch auslaufen würde. Jetzt zwingt man die Watte weiter oben in die Rinne und wartet bis die Benzindämpfe zur Kerze wandern und sich die Rinne entzündet.

Physikalische Erklärung:

Die Benzindämpfe wandern deshalb nach unten, weil sie schwerer als Luft sind. Über der Kerze werden diese Dämpfe angezündet welche sich dann natürlich nach oben ausbreiten. Deshalb ist es wichtig bei diesem Versuch aufzupassen, dass keine brennbaren Materialien in der Nähe liegen und sich keine Hände in der Nähe der

Rinne befinden. Da der Wattebausch beim Experiment zu brennen beginnt, ist es wichtig einen Topf oder ähnliches bereit zu halten, um die Flamme zu ersticken indem man ihr den Sauerstoff wegnimmt.

Sicherheitshinweis:

Auf keinen Fall darf ein Benzinbrand mit Wasser gelöscht werden, da sich das Wasser nicht mit dem Benzin mischt. Da die Dichte von Benzin geringer als Wasser ist würde das Benzin oben auf schwimmen und den Brand nicht löschen. Außerdem zerstäubt das Wasser das Benzin und der Brand könnte sich unkontrolliert ausbreiten. In Abb. 104 a, b ist gut zu sehen was passiert, wenn man Wasser auf einen Benzinbrand schüttet.



a)

b)

**Abb. 104 a, b: Benzinbrände mit Wasser löschen a) Benzinbrand
b) Mit Wasser besprüht**

17.7. Experiment 63: Wunderkerze unter Wasser



Abb. 105: Brennende Wunderkerzen unter Wasser

Material:

- 6 x Wunderkerze
- Glas
- Klebeband (transparent)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Das Glas wird etwa zu $\frac{3}{4}$ mit Wasser gefüllt und abgestellt. Als nächstes wickelt man die Wunderkerze mit dem Klebeband ein und lässt am Ende des Bügels ein Stück frei. Nun zündet man die Kerze am unumwickelten Teil der Kerze an und man kann beobachten, dass diese auch unter Wasser weiterbrennt.

Physikalische Erklärung:

Im Groben besteht eine handelsübliche Wunderkerze aus den Bestandteilen Aluminium, Eisen und Bariumnitrat $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$. Anders als bei herkömmlichen Kerzen, bezieht sie den zur Verbrennung notwendigen Sauerstoff nicht etwa aus der Luft, sondern aus dem Bariumnitrat. Der Klebestreifen dient bei diesem Versuch zur Wärmedämmung. Ohne diese dämmende Schicht würde der Kerze durch das Wasser so viel Wärme entzogen werden, dass das Gemisch unter die Zündtemperatur abkühlen und die Flamme erlöschen würde (vgl. Korthaase, 2010, S. 112).

Bemerkung:

Ein Versuch mit mehreren Wunderkerzen, welche man mit Klebeband zu einem Bündel fixiert, hat gezeigt, dass die Wunderkerzen auch ohne durchgehenden „Schutzmantel“ unter Wasser weiterbrennen. Die Hitze reicht zumindest aus, dass die inneren Kerzen weiterbrennen. Anwendung findet dieses Prinzip zum Beispiel bei sogenannten Tauch- oder Unterwasserfackeln, welche es möglich machen lichtschwache Gegenden unter Wasser gut auszuleuchten.

17.8. Experiment 64: Kettenreaktion

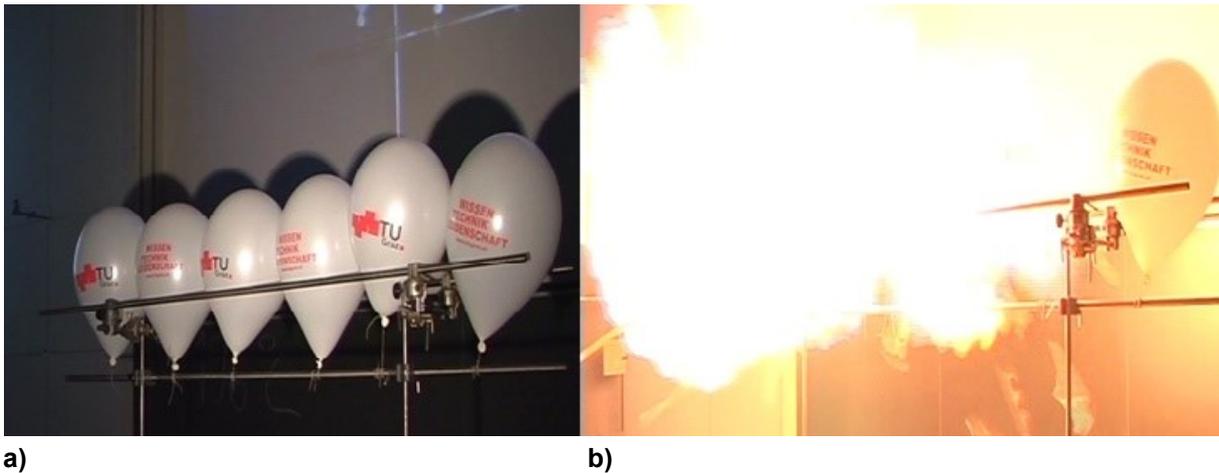


Abb. 106 a, b: a) Anordnung der Methan- und Wasserstoffballons b) Ablauf Kettenreaktion (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Luftballons
- Wasserstoff aus Druckflasche
- Methan aus Druckflasche
- Kerze
- Montagezubehör

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Insgesamt werden sechs Luftballons aufgeblasen und verknotet. Jeweils drei davon werden mit Methan und Wasserstoff gefüllt. Zur besseren Veranschaulichung empfiehlt es sich, für das jeweilige Gas eine eigene Farbe oder unterschiedliche Aufdrücke auf den Ballons zu verwenden. Für eine gute Reaktionsleitung werden die Ballons anschließend, abwechselnd mit Wasserstoff und Methan befüllt und mittels Faden zwischen zwei Führungsstangen fixiert. Um die Effekte besonders hervor zu heben sollte der Raum verdunkelt werden. Wichtig ist es, das Publikum auf die bevorstehende Zündung und Knalle zu informieren. Die Ballons entzündet man mit einer an einem Stiel befestigten Kerze. Es sind drei laute Knalle und drei große Stichflammen zu beobachten.

Physikalische Erklärung:

Durch die Hitze der Flamme platzt der erste Ballon und leitet die Kettenreaktion ein. Es reagiert der Wasserstoff mit dem rundherum befindlichen Sauerstoff. Dabei handelt es sich um einen stark exothermen Prozess, bei dem Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser reagieren. Die Reaktionsgleichung dazu lautet:



Bei einer solch stark exothermen Reaktion führt die Erhöhung der Temperatur zu einer Reaktionsbeschleunigung. Dies endet in einer Explosion, was den lauten Knall erklärt (vgl. Latsch & Klein, 2007, S. 262).

Für die mit Methan gefüllten Ballons gilt die Gleichung:



Dabei reagiert das Methan mit dem Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser. Die vollständige Umsetzung von Methan ist ebenso exotherm, verläuft jedoch etwas langsamer, was die Bildung einer Stichflamme zur Folge hat.

Bemerkung:

Durch das nebeneinander Anbringen der Ballone, erfolgt eine optisch und akustisch gut wahrnehmbare Kettenreaktion. Möchte man lautere Knalle und heftigere Explosionen, befüllt man die Ballons mit einem Drittel Sauerstoff und zwei Drittel Wasserstoff. Damit wird erreicht, dass der für die Reaktion notwendige Sauerstoff bereits hinzu gemischt ist, was die Reaktionszeit beschleunigt (vgl. Latsch & Klein, 2007, S. 275).

Sicherheitshinweis:

Dieses Experiment sollte ausschließlich von erfahrenen Fachkräften durchgeführt werden und eignet sich keineswegs als Hausexperiment. Um einen ausreichenden Sicherheitsabstand zu gewährleisten, ist das Führen der Kerze an einer Lanze unerlässlich.

17.9. Experiment 65: Sauerstoff als Brandbeschleuniger

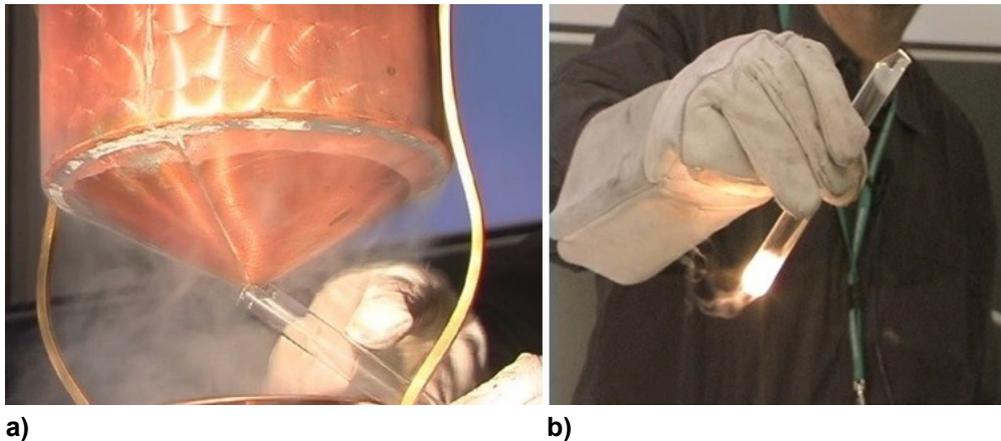


Abb. 107 a, b: a) Abgezapfter flüssiger Sauerstoff b) Glimmender Docht brennt auf (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Flüssigstickstoff
- Destille
- Epruvette
- Kerze
- Dochtschere

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Vor der Durchführung des Experiments muss eine Kerze angezündet werden. Die Destille wird bis etwa zur Höhe des Trichters mit Flüssigstickstoff befüllt und anschließend der Deckel draufgegeben. Nach kurzer Zeit friert die Außenseite der Destille schlagartig an. Vom Trichter im unteren Bereich tropft flüssiger Sauerstoff, welcher mit einer Epruvette aufgefangen wird. Hat man genug Sauerstoff aufgefangen, schneidet man mittels Dochtschere den Docht der Kerze ab, bläst die Flamme aus und gibt den glimmenden Docht in die Epruvette. Schlagartig entflammt dieser wieder und brennt um einiges stärker als zuvor, ehe er nach einiger Zeit erlischt.

Physikalische Erklärung:

Wird in die Destille, welche aus Kupfer besteht flüssiger Stickstoff gefüllt, so kühlt diese auf Grund der hohen Wärmeleitfähigkeit sehr stark ab. Im ersten Schritt kommt

es zur Resublimation der Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Destille. Dabei wird beim Übergang vom gasförmigen zum festen Zustand, der flüssige Zustand übersprungen (vgl. Kuchling, 2014, S. 275). Vergeht noch etwas Zeit, so beginnt der Sauerstoff der Umgebungsluft am ausgeformten Trichter der Destille herunter zu tropfen. Sauerstoff hat einen Siedepunkt von -183 °C , liegt also höher als jener von Stickstoff (-196 °C), welcher sich im Inneren der Destille befindet. (vgl. Kuchling, 2014, S. 639). Dieser Unterschied macht es möglich, dass Sauerstoff am Trichter kondensiert, heruntertropft und anschließend mit einer Epruvette aufgefangen werden kann. Wirft man nun den noch glimmenden Docht in die Epruvette, so erfährt dieser ein Überangebot an Sauerstoff, sodass erneut eine sehr helle Flamme aufkeimt. Dies währt nicht sehr lange, da das Wachs bald aufgebraucht ist, und dieses somit relativ schnell verbrennt.

Bemerkung:

Anstelle der Destille kann auch ein herkömmlicher Schöpflöffel verwendet werden. Auch dieser hat eine hohe Wärmeleitfähigkeit und man kann ebenfalls einen gelungenen Effekt erzielen. Eine weitere Möglichkeit um zu demonstrieren, dass es sich tatsächlich um flüssigen Sauerstoff handelt, wäre folgende. Man hält ein Bündel feine Stahlwolle über eine brennende Kerze bis ein Teil dieser zu glühen beginnt. Daraufhin legt man die noch glühende Stahlwolle unter die tropfende Destille. Da es sich bei den Tropfen wie angesprochen um reinen flüssigen Sauerstoff handelt, wirkt dieser als Brandbeschleuniger und die Stahlwolle entflammt.

Sicherheitshinweis:

Das Arbeiten mit flüssigem Stickstoff birgt einige Risiken. Um etwaigen Erfrierungen vorzubeugen, empfiehlt es sich Handschuhe bei den Arbeiten zu tragen und Ringe sollten ebenfalls abgelegt werden. Ebenso darf das Gefäß nicht luftdicht verschlossen werden, da der Stickstoff vom flüssigen zum gasförmigen Zustand sehr stark expandiert. Des Weiteren sei noch erwähnt, dass teilweise die Epruvetten beim Aufflammen des Dochts gebrochen sind.

17.10. Experiment 66: Flamme und Orangenschale

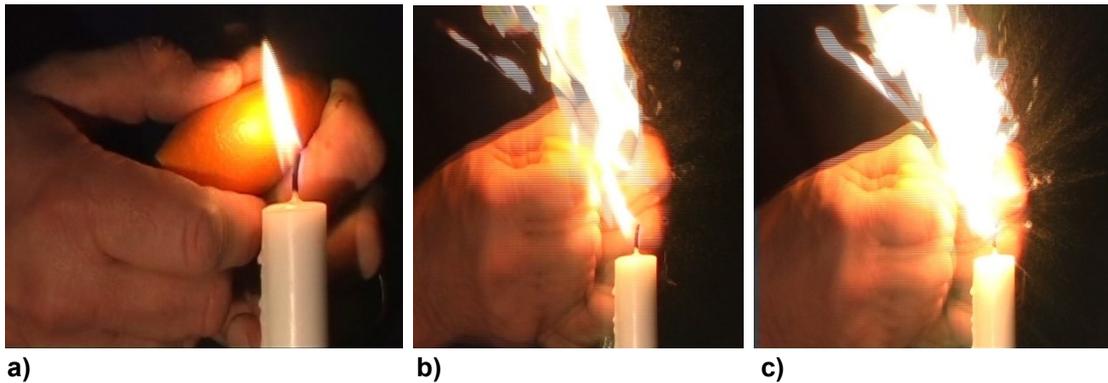


Abb. 108 a, b, c: a) Flamme mit Orangenschale b) Zerdrücken der Orange c) Lichtblitze (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- Orange

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Bei diesem sehr kleinen Experiment braucht man nur eine Kerze und eine Orange. Zuerst schält man die Orange und verwendet die Schale weiter. Danach wird die Kerze angezündet und man drückt die Schale in der Hand über der Kerze zusammen. Wenn die Tröpfchen auf die Kerze treffen gibt es Lichtblitze, welche einem kleinen Feuerwerk ähneln.

Physikalische Erklärung:

In den Orangenschalen oder besser gesagt in den Zellen der Orangenschalen sind ätherische Öle enthalten, die beim Zusammendrücken in die Umgebung entweichen und leicht entzündlich sind. Somit erhält man kleine Lichtblitze, weil sich die ätherischen Öle in der Umgebung verteilen. Diese Öle spürt man auch wenn man sie über die Hände reibt, welche sich dann leicht ölig anfühlen.

Bemerkung:

Auch andere Dinge in unserer Umwelt haben solche Öle in sich, wie zum Beispiel die Blätter eines Nadelbaumes. Auch sie enthalten ätherische Öle, was sie sehr gefährlich im Falle von Waldbränden macht. Wenn man die Nadeln ins Feuer halten würde, dann würden diese zischend mit einer kleinen Flamme verbrennen.

17.11. Experiment 67: Brennender Schaum

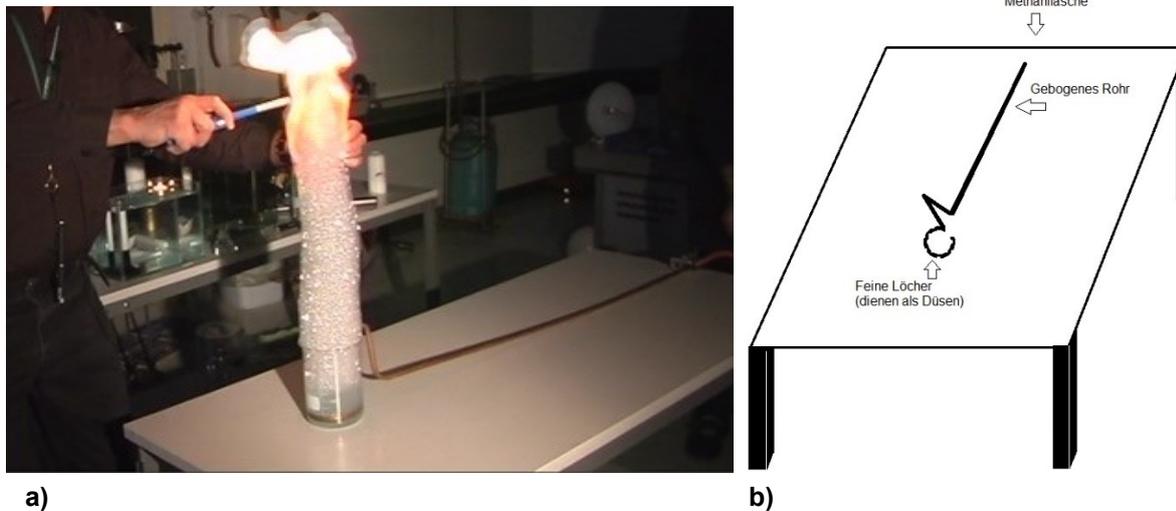


Abb. 109 a, b: a) Schaum beim Entzünden b) Skizze des gebogenen Rohrs (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kupferrohr (Durchmesser 1 cm, Länge 150 cm)
- Glasgefäß
- Methangas aus Druckflasche
- Seifenlösung
- Kerze

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Um einen einfachen Aufbau und eine gelungene Wirkung des Experiments zu gewährleisten, empfiehlt es sich, wie in Abb. 109 b ersichtlich, ein Kupferrohr mit vielen kleinen Löchern im vorderen Kreisteil, zu biegen. Utensilien für die Verbindung zur Methan Gasflasche stammen dabei aus dem Laborfundus. Nachdem man das Glas mit Seifenlauge befüllt hat, führt man das vorbereitete Kupferrohr ein. Durch das einströmende Methangas beginnt die Seifenlösung zu schäumen und steigt nach oben. Dabei kann ein Stab oder ähnliches zum Stützen verwendet werden. Nach Erreichen der gewünschten Höhe zündet man den Schaum mittels Kerze an und dieser brennt vor den Augen der Zuschauer nieder. Die Zuhilfenahme eines Assistenten ist bei diesem Experiment empfehlenswert. Während eine Person den wachsenden Schaum stützt, regelt die Andere das Gasventil.

Physikalische Erklärung:

Durch das einströmende Methan beginnt die Seifenlösung zu schäumen. Das gute vertikale Wachstum lässt sich dadurch erklären, dass Methan eine Normdichte von rund $0,7 \text{ kg/m}^3$ (bei 0 °C und 1013 hPa) und Luft in etwa $1,3 \text{ kg/m}^3$ hat (vgl. Kuchling, 2014, S. 616). Deshalb steigt Methan auf und unterstützt das stetige Wachsen des Schaums. Bei der Entzündung kommt es zu einer Kettenreaktion, bei der das Methan zu Kohlendioxid und Wasser reagiert, was sich durch eine Stichflamme äußert.

Bemerkung:

Es empfiehlt sich den Raum zur besseren Demonstration zu verdunkeln und vor der Zündung den Gashahn abzdrehen. Dieses Experiment sollte unter keinen Umständen mit Wasserstoff nachgemacht werden, da dieser sehr heftig reagiert und es zu einer Explosion kommt.

Sicherheitshinweis:

Aufgrund des entzündlichen Gases und der daraus resultierenden Gefahren, sollte dieses Experiment nur von Fachpersonal durchgeführt werden. Die Verwendung von Schutzbrille und Schutzhandschuhen wird empfohlen.

17.12. Experiment 68: Brennendes Magnesium



Abb. 110: Brennender Magnesiumspan

Material:

- Magnesiumspan
- Zange
- Kerze
- Handschuhe

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Dieser Versuch gilt in erster Linie zur Demonstration der Leuchtkraft von brennendem Magnesium. Es empfiehlt sich dabei feuerfeste Handschuhe zu tragen. Leider gingen die Autoren bei der Durchführung dieses Experiments mit schlechtem Beispiel voran. Der Magnesiumspan wird zuerst mit einer Zange fixiert und anschließend mittels einer Kerze angezündet. Es entsteht eine Flamme die sehr hell leuchtet.

Physikalische Erklärung:

Die Temperatur der Kerzenflamme reicht bereits aus, um den Magnesiumspan zu entzünden. Obwohl Magnesium erst bei einer Temperatur von rund 600 °C zu schmelzen beginnt, fängt es durch den in der Luft befindlichen Sauerstoff, bereits oberhalb von 450 °C zu brennen an. Die dabei entstehenden Temperaturen haben über 2400 °C und die Flamme ein blendend helles Licht. Zudem bildet sich weißer Rauch und weißes Pulver, wobei es sich um Magnesiumoxid handelt.

Bemerkung:

Aus dem Experiment lässt sich ableiten, dass Magnesium in kompakter Form, im Gegensatz zu Spänen, Stäuben und Pulvern, ungefährlich in der Handhabung ist (vgl. Amt der OÖ Landesregierung, 2001, S. 41).

Anklang findet der Werkstoff Magnesium auch im Automobilbau. Das geringe Gewicht und die Werkstoffeigenschaften bringen große Vorteile gegenüber Stahl und Aluminium. Dafür sprechen die hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit, sowie bessere Dämpfungseigenschaften und es kann vollständig recycelt werden. Die Angst vor sehr heißen Magnesiumbränden bei Fahrzeugen ist begründet, aber Brandversuche der Volkswagen AG, gemeinsam mit der International Magnesium Association und der Feuerwehr führten zur Erkenntnis, dass es in kompakter Form schwer entflammbar und als Gefahrenquelle bei Fahrzeugbränden ausgeschlossen werden kann. Ein Zwischenfall im Motorsport beim Großen Preis von Frankreich 1968, bei dem ein Fahrer in einem Fahrzeug mit Magnesiumkarosserie verbrannte, verleitet die Fédération Internationale de l'Automobile (FIA), dass bei Formel 1 Autos die Magnesiumschichten nicht dünner als drei Millimeter sein dürfen. Die leichte Entzündbarkeit des Werkstoffs ist lediglich bei der Verarbeitung das Problem, wo sich beispielsweise die entstehenden Stäube leicht entzünden können (vgl. Urban, 2015, S. 154 – 156). Außerdem wurde Magnesium früher im Bereich der Fotografie verwendet. So kam es dass man im 19. Jahrhundert die Magnesiummischung, bestehend aus Magnesiumpulver, Kaliumchlorat und Schwefelantimon, kontrolliert zündete und somit als Blitzlicht diente. Trotz aller Vorwarnung waren die Modelle auf den Bildern, aufgrund des grellen Lichts, sichtlich erschrocken (vgl. Ottersbach, 1919 S. 639).

Sicherheitshinweis:

Bei Magnesiumbränden ist äußerste Vorsicht geboten. Es darf auf keinen Fall mit Wasser gelöscht werden. Die hohe Verbrennungstemperatur führt dazu, dass das Wasser zersetzt wird und sich das explosive Wasserstoffgemisch entzünden kann. Außerdem brennt es auch in Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid und Stickstoffmonoxid, da es diesen Verbindungen den Sauerstoff entzieht. Es empfiehlt sich daher brennendes Magnesium mit trockenem Sand, rostfreien Eisenspänen oder mit wasserfreien Alkali- beziehungsweise Erdalkalisalzen zu löschen (vgl. Amt der Oö Landesregierung, 2001, S. 41).

17.13. Experiment 69: Brennender Schneeball



Abb. 111: Brennender Schneeball

Material:

- Kampferstück ($C_{10}H_{16}O$)
- Schnee oder fein zerstoßenes Eis
- Kerze

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Vor dem Präsentieren des Experiments besorgt man sich aus der Apotheke ein Stück Kampfer. Diesen verwahrt man unersichtlich für das Publikum auf dem Pult neben einem Behälter für den Schnee auf. Man wählt eine Person aus und lässt diesem einen Schneeball formen. Anschließend teilt man mit, den Schneeball noch etwas nachformen zu müssen. Dabei nimmt man das Stück Kampfer so hinter dem Schneereservoir hervor, dass es für den Zuseher nicht erkenntlich ist, dass es sich nicht um Schnee handelt, zumal Kampfer diesem sehr ähnelt. Man drückt nun das Stück in den Schneeball. Daraufhin hält man den Schneeball über eine offene Kerzenflamme und man kann beobachten, der Schneeball „brennt“.

Physikalische Erklärung:

Um die Brennbarkeit von Schnee zu gewährleisten, bedient man sich dem Kampfer. Dieser brennt aufgrund der ätherischen Öle an der Luft mit einer stark rußenden und leuchtenden Flamme. Deshalb empfiehlt es sich, dieses Experiment nur draußen durchzuführen (vgl. Krätz, 1979, S. 44).

Bemerkung:

Kampfer wird aus dem Kampferbaum (lat. *cinnamomum camphora*), welcher überwiegend in Asien beheimatet ist, gewonnen. Dem ätherischen Öl, welches aus den Holzschnitzeln gewonnen wird, schreibt man zudem eine arzneiliche Wirkung gegen Husten, Erkältungen und Rheuma zu. Ein weiterer Lieferant von Kampfer ist der sogenannte drüsige Kampferbaum (lat. *cinnamomum glanduliferum*), welcher aus Indien oder Nepal stammt (vgl. Spohn & Spohn, 2011, S. 26).

17.14. Experiment 70: Brennender Geldschein



Abb. 112: Brennender 10 Euroschein

Material:

- Geldschein
- Schüssel
- Verdünntes Ethanol C_2H_5OH (42 – 50 %)
- Kerze
- Grillzange

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zunächst mischt man in einer Schüssel Wasser und Ethanol im Verhältnis 1:1. Darin wird der Geldschein getränkt und anschließend mittels Grillzange über eine Kerzenflamme gehalten. Schlagartig fängt dieser Feuer, welches nach ein paar Sekunden wieder erlischt. Trotz Flammenentwicklung bleibt der Geldschein unversehrt.

Physikalische Erklärung:

Die Erklärung warum der Geldschein brennt, aber nicht verbrennt, liegt am Mischverhältnis zwischen Ethanol und Wasser. Nach dem Entzünden dieser Mischung, beginnt das leicht entzündliche Ethanol, genauer gesagt die Dämpfe des Ethanols zu brennen. Würde kein Wasser beigemischt werden, würde mehr und

mehr Ethanol verdampfen und der Geldschein würde aufgrund der hohen Verbrennungswärme verbrennen. Das Wasser jedoch entzieht dem Vorgang durch die Verdampfungswärme so viel Energie, dass nur das niedrigsiedende und leicht entflammbare Ethanol verbrennt.

Bemerkung:

Als Alternative zum Ethanol, würde sich auch Isopropanol (C_3H_7OH) eignen (vgl. Kreißl & Krätz, 1999, S. 217-218). Auch Schnaps, der in fast jedem Haushalt zu finden ist, würde sich eignen, wenn er 42 % an Alkoholgehalt aufweist.

Sicherheitshinweis:

Die Verbrennung verläuft zwar recht moderat, jedoch muss darauf geachtet werden, dass die Flüssigkeit den Alkoholgehalt von 50 % nicht übersteigt, da sonst die Kühlleistung des Wassers zu schwach ist und der Geldschein abbrennen würde.

17.15. Experiment 71: Flaschengeist:

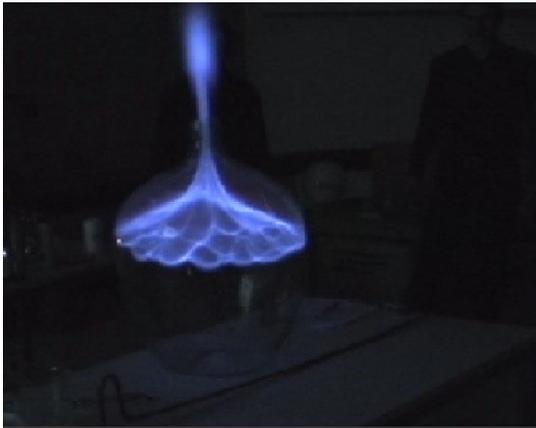


Abb. 113: Flaschengeist
(Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Große transparente Apothekerflasche
- Spiritus
- Kerze mit langem Stumpf
- Feuerzeug

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Als erstes füllt man in die Flasche rund 10 ml Spiritus und verschließt diese. Daraufhin schwenkt man die Flasche für einige Zeit um den Alkohol mit der darin befindlichen Luft gut zu vermischen. Nach dem Schwenken entfernt man den Verschluss und bringt die Kerzenflamme an die Öffnung der Flasche. Es kommt zu einem raschen Entzünden des Gemisches. Dabei brennt die Flammenebene dann in der Flasche nach unten. Bei sofortiger Wiederholung des Experiments mit derselben Flasche kommt es zu keiner Zündung.

Physikalische Erklärung:

Spiritus an sich ist vergälltes Ethanol und verdampft bereits bei Raumtemperatur. Schüttelt und schwenkt man die Flasche, vermischen sich die Ethanoldämpfe mit der in der Flasche befindlichen Luft. Dies ergibt eine hochentzündliche Mischung. Wird dies nun mittels Kerze entzündet, erhöht sich die Temperatur in der Flasche und bewirkt eine Ausdehnung der darin befindlichen Luft. Dadurch entweicht ein Teil des entzündeten Spiritus-Luftgemisches durch den Flaschenhals hinaus, was die

plötzliche Stichflamme erklärt. Zum Erliegen kommt der Vorgang wenn entweder das gesamte Ethanol oder aber auch der Sauerstoff in der Flasche verbraucht ist. Ist der Sauerstoff verbraucht, lässt sich der Vorgang, trotz erneutem Befüllen mit Ethanol, nicht wiederholen. Man muss die Flasche für einige Zeit stehen lassen oder schwenkt sie geöffnet an der Luft, ehe man das Experiment erneut durchführen kann.

Bemerkung:

Besonders spektakulär für die Zuschauer wird dieses Experiment in einem abgedunkelten Raum. Außerdem ist es möglich die Kerzenflamme einzufärben. Dazu mengt man dem Alkohol beispielsweise etwas Bariumnitrat in Pulverform bei, welches in der Apotheke erhältlich ist (vgl. Steinwender, 2012, S. 121 - 122).

Sicherheitshinweis:

Es empfiehlt sich für diesen Versuch eine langstielige Kerze oder ein langstieliges Feuerzeug zu verwenden, da der Verbrennungsvorgang mitunter recht heftig ausfällt, was Verbrennungen an den Händen zur Folge haben kann.

18. Experimente zur Auslöschung von Kerzen

Um ein Feuer zu löschen, muss eine Voraussetzung des in Kapitel 7 beschriebenen Verbrennungsdreiecks beseitigt werden. Dafür eignen sich hier verschiedene Möglichkeiten:

- Entzug der Brennmasse
- Entzug des Sauerstoffs
- Abkühlen unter die Zündtemperatur

Eine freistehende Kerze, sofern sicher aufgestellt, wird nach einiger Zeit von selbst erlöschen, nämlich dann, wenn das Wachs, also die Brennmasse aufgebraucht ist. Wird eine Kerze jedoch in einem luftdichten Gefäß aufbewahrt, so wird sie womöglich schneller, aufgrund von Sauerstoffmangel erlöschen. Das Abkühlen unter die Zündtemperatur gelingt bereits durch das Ausblasen einer Kerze. Trotzdem sollte eine Kerze nie ausgeblasen werden, da Wachsspritzer entstehen. Die Kerze sollte mit einer Kerzenlöscher Glocke erstickt werden wie in Experiment 84 beschrieben. Dies wären drei typische Beispiele zum üblichen, beziehungsweise natürlichen Auslöschung einer Kerze. Die in den folgenden Seiten erläuterten Experimente stützen sich allesamt auf zumindest einen dieser drei Punkte.

18.1. Experiment 72: Auslöschen mit PET Flasche und Stickstoff



a)

b)

Abb. 114 a, b: Auslöschen eines Kerzenkranzes mit Stickstoff a) Versuchsaufbau
b) Auslöschung durch Explosion (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Abgesägte Sauerstoff Druckflasche
- Holzring (Durchmesser ca. 1 m)
- 80 Kerzen
- PET Flasche (2 l)
- Heißes Wasser
- Flüssiger Stickstoff

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zuerst werden alle 80 Kerzen auf dem Ring angebracht. Dies funktioniert am besten, indem man sie an der Unterseite des Stumpfes aufschmilzt und auf den Holzring setzt. Der Ring wird anschließend zentral über der Druckflasche angebracht. Nach dem Entzünden der Kerzen gibt man heißes Wasser in die Druckflasche und befüllt die PET Flasche zu einem Viertel mit flüssigem Stickstoff. Nun wirft man die Flasche in das Rohr, wartet 17 Sekunden, ehe es zu einem sehr lauten Knall kommt und die Kerzen erlöschen.

Physikalische Erklärung:

Flüssiger Stickstoff hat in etwa eine Temperatur von -210 °C . Aufgrund der Siedetemperatur von rund -196 °C , geht innerhalb sehr kurzer Zeit sehr viel Stickstoff

vom flüssigen in den gasförmigen Zustand über (vgl. Kuchling, 2014, S. 636-639). Dies hat eine immense Volumsausdehnung zur Folge, was schließlich zu einem Druckanstieg in der Flasche führt. Beschleunigt wird dieser Vorgang durch das heiße Wasser, welches den Flüssigstickstoff rascher erwärmen lässt. Wird der Berstdruck, im Bereich von 15 bar überschritten, kommt es zur Explosion. Die daraus resultierende Druckwelle folgt dem Weg nach oben aus der Druckflasche, ehe sie danach die umliegenden Luftmassen beschleunigt und die Kerzen auslöscht. Grund dafür ist, dass es zur Unterbrechung der Brennmassenzufuhr und zu einer Abkühlung der Temperatur, aufgrund des Luftstroms kommt.

Bemerkung:

Für diesen Versuch wurde eine Sauerstoff Druckflasche verwendet, um sicher zu gehen, dass sie der Explosion stand hält und keine falschen Teile oder sonstiges die Zuseher treffen könnten. Die Einhaltung eines gewissen Sicherheitsabstandes ist dennoch unerlässlich. Das Verwenden von heißem Wasser hat außerdem den Vorteil, dass der Vorgang des Ausdehnens nicht über Minuten hinausgezögert wird und so das Publikum kurz nach dem Einwerfen der Flasche auf den Knall gefasst sein kann. Es empfiehlt sich zudem, die Ohren mit den Händen zu verschließen (vgl. Steinwender, 2012, S. 45 - 47).

Sicherheitshinweis:

Dieses Experiment sollte ausschließlich von erfahrenen Fachkräften durchgeführt werden. Wichtig dabei ist, dass über der Druckflasche genügend freier Raum ist, sodass nichts beschädigt werden kann. Außerdem ist die Einhaltung eines gewissen Sicherheitsabstandes dennoch unerlässlich und das Tragen eines Ohrenschutzes (Ohropax) sehr zu empfehlen.

18.2. Experiment 73: Die essbare Kerze



Abb. 115: Essbare Kerze (<http://www.science.lu/de/content/die-essbare-kerze-%E2%80%93-der-ideale-anfang-f%C3%BCr-ein-perfektes-dinner>)

Material:

- Marzipan
- Ethanol
- Mandelsplitter

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Zuerst knetet, beziehungsweise formt man aus dem Marzipan eine Kerze nach beliebiger Gestalt. Um den Docht nachzubilden, wird ein Mandelsplitter dafür verwendet. Ehe man diesen jedoch aufsetzt, trinkt man ihn in Ethanol. Für ein noch besseres Brennverhalten bietet es sich an, den Splitter für einige Zeit in ein Ethanolbad zu legen. Schließlich wird die Kerze entzündet um anschließend genüsslich verzehrt zu werden.

Physikalische Erklärung:

Für das Brennen des Mandelsplitters sorgen einerseits die darin befindlichen ätherischen Öle, andererseits das Tränken in Ethanol, was die Entzündlichkeit fördert (vgl. Krätz, 1979, S. 44).

Bemerkung:

Dies ist ein klassischer Publikumsversuch, welcher in jedem Fall für kurzes Aufatmen sorgen wird. Vorsicht ist jedoch beim Verzehr geboten, da der Mandelsplitter durch den Brennvorgang sehr heiß wird. Um ein möglichst authentisches Brennverhalten zu garantieren, sollte man den Mandelsplitter rund 24 Stunden in das Ethanolbad legen. Alternativen zum Kerzenstumpf aus Marzipan wären gestanzte Formen aus Äpfeln, Birnen oder Kartoffeln.

18.3. Experiment 74: Essig und Backpulver als Feuerlöscher



Abb. 116: Kerzen mit Kohlendioxid löschen (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Tafelessig
- zwei Packungen Backpulver
- Kunststoffzylinder (transparent)
- vier Kerzen
- Metallgestell
- Eimer

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Das für den Versuch gefertigte Metallgestell wird mit den vier Kerzen bestückt, diese werden angezündet und in den Kunststoffzylinder eingeführt. In den vorbereiteten Eimer gibt man zuerst das Backpulver und anschließend ungefähr einen viertel Liter Tafelessig hinzu. Sofort beginnt das Gemisch zu schäumen und man lässt diesen Vorgang ein bis zwei Minuten wirken. Anschließend nimmt man den Eimer und neigt ihn über den Kunststoffzylinder. Es wird beobachtet, dass alle Kerzen erlöschen.

Physikalischer Erklärung:

Durch die chemische Reaktion von Backpulver mit Tafelessig wird unter anderem Kohlenstoffdioxid produziert. Da dieses Gas schwerer ist als Luft, verbleibt es im Eimer. Kippt man nun den Eimer über den Zylinder, so verdrängt das schwerere

Kohlenstoffdioxid den darin befindlichen Sauerstoff, was das Erlöschen der Kerzen erklärt (vgl. Meurer & Zablocki, 2005, S. 8).

Bemerkung:

Weiterführende Versuche zu den Löscheigenschaften von Kohlenstoffdioxid oder anderen Gasen wären:

- 1) Man entnimmt aus einem handelsüblichen Kohlendioxidlöscher das Gas, indem man auf einen Eimer zielt und es entweichen lässt. Auch hier bleibt das Gas aufgrund der höheren Dichte im Eimer. Anschließend kippt man den Eimer auch über den Zylinder und die Kerzen erlöschen aus demselben Grund.
- 2) Man leitet mittels eines Kunststoffschlauches Argon aus einer Druckflasche in den Zylinder. Wichtig ist dabei, dass sich die Schlauchöffnung am Boden des Zylinders befindet, um einen schönen Effekt zu erzielen. Auch Argon ist schwerer als das Gasgemisch Luft und wenn man den Gashahn öffnet, erlöschen die Kerzen beginnend von der Untersten bis zur Obersten (vgl. Pottlacher, 2012).

Für die Zuseher wirken diese Experimente als würde das Auslöschen von Zauberhand geschehen. Es ist eine sehr schöne Demonstrationsweise um Kerzenflammen mittels verschiedener Gase zu löschen. Kohlendioxidlöscher finden vor allem bei der Bekämpfung von Kabel- und kleinen Flüssigkeitsbränden ihren Einsatz. Zum einen werden die noch intakten Verkabelungen, beziehungsweise elektronischen Geräte geschont und zum anderen kann es zu keiner explosiven Gasmischung kommen.

18.4. Experiment 75: Verbrennung einer Kerze in Luft und in Atemluft



Abb. 117: Auslöschen über Atemluft

Material:

- 2 x Kerzen
- 2 x Gläser
- Luftballon

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die zwei Kerzen werden für dieses Experiment nebeneinander aufgestellt und die zwei Gläser daneben bereitgestellt. Der Luftballon wird aufgeblasen um möglichst viel Atemluft zu sammeln. Anschließend zündet man die Kerze an, „speichert“ die Luft vom Luftballon in einem Glas und stülpt beide Gläser gleichzeitig über die Flammen. Die Kerze unter dem Glas mit Atemluft wird schneller ersticken als die unter normaler Luft.

Physikalische Erklärung:

Der Sauerstoffgehalt in der Luft beträgt ungefähr 21 % und die Kerze brennt unter dem Glas so lange bis der Sauerstoff verbraucht ist. Die Ausatemluft hat jedoch nur einen Sauerstoffgehalt von 16 % und aus diesem Grund erstickt eine Kerze unter Atemluft schneller als unter der Umgebungsluft (vgl. Lang, 2014, S. 198).

Bemerkung:

In der Atemluft ist zwar wesentlich weniger Sauerstoff enthalten, dafür liegt der Kohlendioxidgehalt der Atemluft bei ca. 4 %. In der Umgebungsluft beträgt der Kohlendioxidgehalt nur 0,03 % (vgl. Lang, 2014, S. 198).

18.5. Experiment 76: Auslöschen mit Mineralwasser



Abb. 118: Kerze mit Mineralwasser löschen

Material:

- Kerze (Teelicht)
- Mineralwasserflasche
- Korken, der auf die Flasche passt
- dünner langer Schlauch
- Glas

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die Flasche wird so präpariert, dass der Korken auf den Flaschenhals kommt und der Schlauch in das vorher gebohrte Loch des Korkens. Das andere Ende des Schlauches wird in das Glas gelegt und die Kerze anschließend angezündet. Durch vorsichtiges Schütteln der Flasche bringt man die Kerze nach kurzer Zeit zum Ersticken.

Physikalische Erklärung:

Die Bläschen im Mineralwasser beinhalten Kohlendioxid und Kerzen brauchen zum Brennen Sauerstoff. Das Kohlendioxid kommt durch Schütteln über den Schlauch in das Glas und da dies schwerer ist als Luft, bleibt es auch im Glas. Wenn genug Kohlendioxid ins Glas geflossen ist, verdrängt dies die Luft, die Kerze hat keinen Sauerstoff mehr von der Luft zum Verbrennen übrig und die Kerze erstickt. Dieses Experiment würde auch mit einer Brausetablette funktionieren, da auch damit Kohlendioxid entstehen und die Kerze damit erstickt würde.

18.6. Experiment 77: Auslöschen mit flüssigem Stickstoff



Abb. 119: Kerze mit flüssigen Stickstoff löschen

Material:

- Kerze
- flüssiger Stickstoff
- Behälter

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Bei diesem Experiment wird die Kerze am Besten in einen Behälter gestellt, welcher zur besseren Demonstration transparent sein sollte. Nach dem Anzünden der Kerze wird der Stickstoffbehälter genommen und es wird vorsichtig etwas in den Behälter geschüttet, bis die Kerze erlischt.

Physikalische Erklärung:

Die Kerze sollte ziemlich schnell ausgehen, da zwei Faktoren die Flamme der Kerze löschen. Zum einen hat flüssiger Stickstoff eine Temperatur von unter -196 °C und der Kerze wird so viel Wärme entzogen, bis sie erlischt, zum anderen wird der flüssige Stickstoff gasförmig, da die Umgebungstemperatur viel höher ist und dies auch über den Wasserdampf zu sehen ist. Dieser gasförmige Stickstoff verdrängt die Umgebungsluft und nimmt der Flamme den Sauerstoff, bis sie erstickt.

18.7. Experiment 78: Ausblasen hinter runder und eckiger Flasche



Abb. 120: Kerzen hinter Flaschen ausblasen

Material:

- zwei Kerzen
- Dickbauchige runde Flasche
- Dickbauchige eckige Flasche

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Als Erstes werden beide Flaschen in einem Abstand von etwa 0,5 m nebeneinander aufgestellt. Danach platziert man die Kerzen jeweils in gleichem Abstand dahinter und entzündet diese. Jetzt pustet man zuerst mit geringem Abstand auf die runde Flasche. Dies führt zum sofortigen Erlöschen der Flamme. Anschließend pustet man mit etwa dem gleichen Abstand auf die eckige Flasche. Nach stärkerer Bewegung der Kerzenflamme, brennt diese jedoch weiter.

Physikalische Erklärung:

Um dieses Phänomen zu erklären bedient man sich den Gesetzmäßigkeiten der Strömungslehre. Der Einfachheit halber wird die runde Flasche auf einen Zylinder reduziert, der sich einem Luftstrom entgegenstellt. Treffen die Luftmassen auf die Stirnseite, so teilen sie sich auf, strömen entlang des Zylinders und werden dabei beschleunigt wobei sie in Punkt P (Abb. 121) die größte Geschwindigkeit erreichen. Die Erhöhung der Geschwindigkeit hat die Erhöhung des dynamischen Drucks zur Folge, was nach Bernoulli zu einer Verringerung des statischen Drucks führt (vgl. Kuchling, 2014, S. 164), siehe Gl. 16.2. Bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten ist die Reibung zu vernachlässigen. Die Luftteilchen reißen aufgrund des Unterdrucks erst bei Staupunkt S_2 ab. Im Fall des hier angeführten Experiments geht man von einer höheren Strömungsgeschwindigkeit aus, worauf man nun den Reibungswiderstand nicht mehr außer Acht lassen darf. Demnach erreichen die Luftteilchen nichtmehr die volle Geschwindigkeit, was dazu führt, dass sie bereits vorher, nämlich in den Staupunkten W abreißen, in die Gegenrichtung abgelenkt werden und Wirbel erzeugen. Diese Wirbel sind in der Lage die Kerze auszulöschen (vgl. Demtröder, 2008, S. 248 - 249). Beim eckigen Körper werden die Luftteilchen so stark abgebremst und abgelenkt, dass sie sehr viel früher abreißen. Dies führt ebenso zu einer verwirbelten Zone. Diese ist jedoch weitläufiger und schwächer und verhindert somit das Auslöschten der Kerze. Umgangssprachlich spricht man auch vom Windschatten indem sich die Kerze befindet.

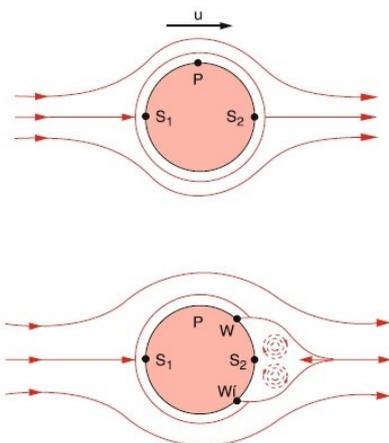


Abb. 121: Entstehung von Wirbeln (Demtröder, 2008, S. 248)

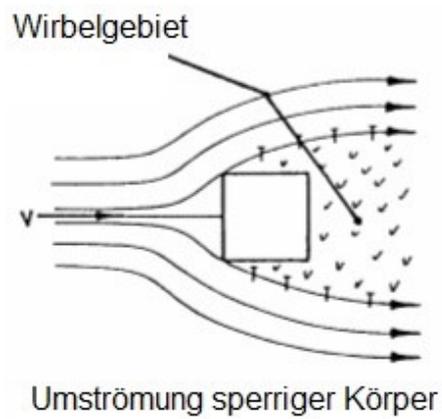


Abb. 122: Umströmung eines Körpers (Siekamann & Thamsen, 2007, S. 204)

Bemerkung:

Die Litfaßsäule ist daher kein geeignetes Objekt, um vor heftigen Stürmen Schutz zu suchen. Es empfiehlt sich eine massive Mauer oder ähnliches aufzusuchen.

18.8. Experiment 79: Ausblasen von Scherzkerze

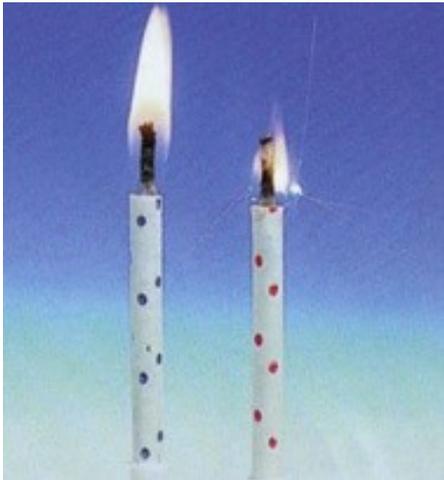


Abb. 123 Scherzkerzen (<http://www.firlefantastisch.de/Scherzkerzen>)

Material:

- 3 x Scherzkerze oder magische Kerze

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Den besten Effekt erzielt man bei diesem Versuch wenn man ihn von einer unvoreingenommenen Person durchführen lässt. Dazu bittet man diese, die bereits brennenden Kerzen auszupusten. Die Person pustet auf die Kerzenflammen und stellt fest, dass einzelne, oder gar alle immer wieder zu brennen beginnen. Begleitet wird das erneute Entfachen von kleinen aufblitzenden Funken.

Physikalische Erklärung:

Das Geheimnis der Scherzkerzen steckt im Docht. Darin sind kleine Partikel von Magnesium eingearbeitet, welche nach dem Ausblasen noch sehr heiß sind und weiterglühen. Aufgrund der Reaktionsfreudigkeit mit Sauerstoff entzünden sich diese Partikel unter leichtem Funkenflug und entzünden den noch heißen Wachsdampf und die Kerze flammt erneut auf.

Bemerkung:

Scherzkerzen sind auf Kindergeburtstagen ein Garant für Spaß.

18.9. Experiment 80: Kerzenaquarium

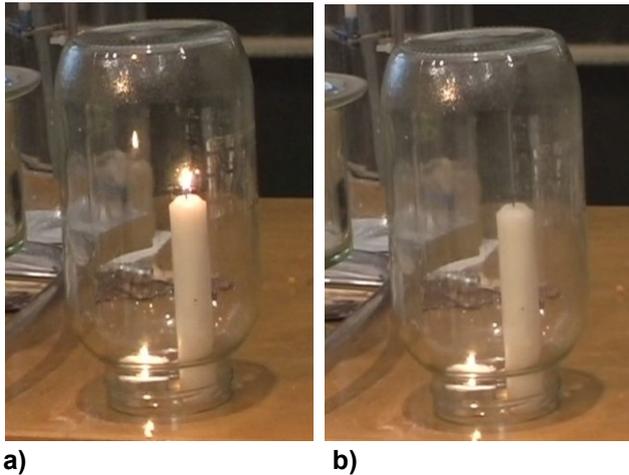


Abb. 124 a, b: Kerzenaquarium a) Noch brennende Kerzen b) Obere Kerze erstickt (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerzen (1 x groß, 1 x klein)
- Glasgefäß (beide Kerzen sollten darin Platz haben)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die zwei Kerzen werden so nebeneinander platziert, dass das Glas darüber gestülpt werden kann. Man möge meinen das die untere Kerze zuerst ausgeht, da das bei der Verbrennung freigesetzte Kohlendioxid nach unten wandert, da es ja schwerer als Luft ist, aber man wird feststellen, dass die obere Kerze zuerst ausgehen wird und die untere danach.

Physikalische Erklärung:

Zuerst einmal die Erklärung warum die Kerzen überhaupt ausgehen. Für das Brennen der Flammen wird Sauerstoff benötigt. Wenn jetzt aber wie in diesem Experiment ein Glas über die Kerzen gestülpt wird, kann kein Sauerstoff mehr nachkommen und die Kerze erstickt. Nun bildet sich bei der Verbrennung Kohlendioxid, welches eigentlich schwerer als Luft ist und nach unten wandern sollte, um die untere Kerze zuerst zu löschen. Da aber über die Verbrennung auch viel Wärme entsteht und das Kohlendioxid direkt nach der Verbrennung heiß ist und deshalb leichter als die kühlere Umgebungsluft ist sammelt sich das Kohlendioxid am oberen Ende des Glases und erstickt dort die obere Kerze zuerst.

18.10. Experiment 81: Kerzenlift

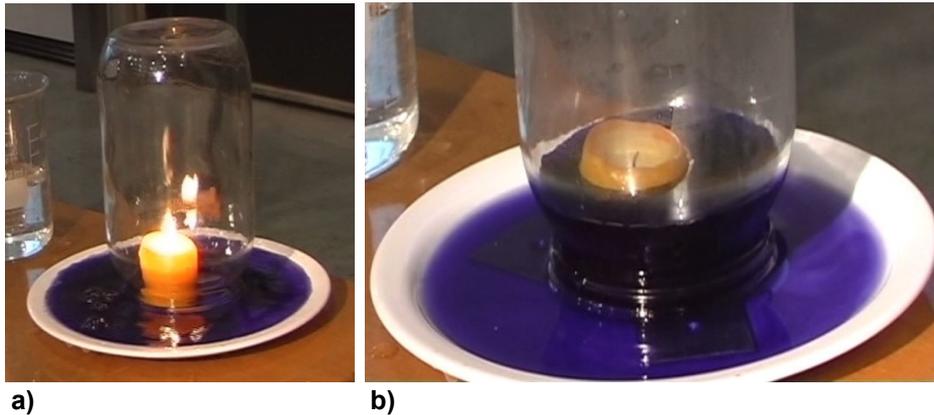


Abb. 125 a, b: Kerzenlift a) Vor Versuch b) Nach dem Versuch (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerze
- Kleiner Teller
- Wasser (evtl. mit Farbstoff)
- Glas
- 3 x Beilagscheiben

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Der Teller wird auf einem Tisch platziert und mit Wasser aufgefüllt. Wenn ein Farbstoff zur Verfügung steht kann man diesen mit dem Wasser vermischen um den Effekt besser zu zeigen. Dann werden die Beilagscheiben so im Kreis in das Wasser gelegt, dass man das Glas mit der oberen Seite genau darauf stellen kann. Nun wird die Kerze noch in die Mitte der Scheiben gestellt und angezündet. Jetzt wird noch das Glas über die Kerze gestülpt und wartet bis sich das Wasser im Glas hebt und die Kerze mit. Somit ist unser Kerzenlift fertig.

Physikalische Erklärung:

Viele mögen glauben das die Kerze die Luft im Glas verbrennt und deshalb das Wasser im Glas steigt, aber bei der Verbrennung der Luft oder besser gesagt des Sauerstoffes der Luft wird diese nur umgewandelt zum Teil in Kohlendioxid und zum Teil in Wasserdampf. Der Verbrennungsvorgang einer Kerze wird aber genauer in Kapitel 7 behandelt. Schauen wir uns das Experiment genauer an. Wenn wir das

Glas über die brennende Kerze stellen können wir nach einiger Zeit am Rand des Glases ein Blubbern des Wassers erkennen. Dies ist die Luft die entweicht, da durch die Flamme im Glas die Luft erwärmt wird und sich diese ausdehnt. Da aber zu wenig Platz im Glas zur Ausdehnung vorhanden ist strömt die Luft unter dem Glas durch das Wasser nach draußen. Wenn jetzt aber durch den Sauerstoffmangel die Kerze erstickt, dann kühlt die Luft im Glas wieder ab und ihr Volumen sinkt wieder. Dies hat zur Folge, dass der äußere Umgebungsdruck nun größer als in dem Glas ist und deshalb das Wasser nach innen gedrückt wird. Weitere Faktoren die bei diesem Experiment hinzukommen sind zum einen, dass der entstehende Wasserdampf tatsächlich weniger Platz als Sauerstoff braucht und manchmal kann man den Wasserdampf gut ausmachen wenn sich das Glas leicht beschlägt. Zum anderen löst sich das entstandene Kohlendioxid zum Teil mit dem Wasser. Aber diese zwei Faktoren spielen nur eine kleine Rolle bei diesem Versuch. Der große Anteil entfällt auf die oben genannten Tatsachen.

Bemerkung:

Im Alltag und in der Natur finden die Kräfte zwischen Druckunterschieden häufig Verwendung, wie zum Beispiel beim Saugnapf. Jeder von uns hat schon mal einen Saugnapf verwendet und er funktioniert nach dem Prinzip von Druckunterschieden. Wenn der Saugnapf auf eine Oberfläche gedrückt wird, dann wird die Luft im inneren des Saugnapfes verdrängt und es entsteht ein Unterdruck, der den Saugnapf an Ort und Stelle hält. Deswegen funktioniert dieser auch nur auf glatten Oberflächen weil sich sonst die Druckunterschiede durch Luftaustausch wieder ausgleichen. Die in der Natur besten Beispiele, welche dieses Prinzip nutzen, wären Kraken oder Geckos.

Auch im Flugzeugbau wird dieses Prinzip berücksichtigt, weil beim Steig oder Sinkflug die Druckdifferenz der Kabine und des Umgebungsdrucks zu groß wäre, da der Druck mit der Höhe niedriger wird. Deshalb wird der Kabinendruck auch über Lufteinlässe geregelt umso die Kräfte auf den Rumpf so gering wie möglich zu halten (vgl. Wörner, 2006, S. 24).

Denselben Effekt macht man in Experiment 82 zu Nutze, bei dem versucht wird, ein hartgekochtes Ei in eine Flasche zu bekommen.

18.11. Experiment 82: Ei in eine Flasche

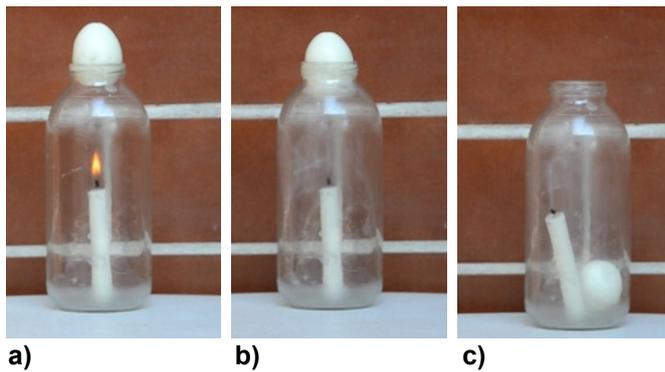


Abb. 126 a, b, c: a) Versuchsaufbau b) Ei wird eingesogen
c) Ei in Flasche

Material:

- Kerze (muss durch Flaschenhals passen)
- Flasche (Glas)
- hartgekochtes Ei

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Bei diesem Experiment kann als Vorbereitung ein hartgekochtes Ei mitgenommen werden oder man lässt es schnell acht Minuten im kochenden Wasser hart werden. Die Kerze muss für dieses Experiment dünner als der Flaschenhals sein da diese in die Flasche gestellt werden muss. Um eine gute Durchführung zu gewährleisten, sollte die Flasche aus Glas sein, damit die Flamme diese wie beim Kunststoff, möglichst nicht aufweichen kann. Die Kerze wird nun angezündet, das hartgekochte Ei geschält und am Flaschenhals platziert. Die Kerze erstickt nach einiger Zeit, da kein Sauerstoff mehr nachkommen kann und kurze Zeit später wird das Ei in die Flasche gezogen.

Physikalische Erklärung:

Die Kerze in der Flasche erwärmt die Luft darin, diese dehnt sich aus und kann über den Flaschenhals und dem Ei entweichen. Wenn die Kerze erstickt, dann kühlt die Luft in der Flasche wieder ab, es entsteht ein Unterdruck oder besser gesagt die Umgebungsluft um die Flasche weist einen höheren Druck auf und drückt das Ei somit nach innen in die Flasche.

18.12. Experiment 83: Auslöschen mittels mini Feuerlöscher (Scherzfeuerlöscher)



Abb. 127:
Scherzfeuerlöscher

Material

- Kerze
- Mini-Feuerlöscher

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Für dieses Experiment braucht man einen Scherzfeuerlöscher den man mit Wasser auffüllen kann und welcher dann wie eine Spritzpistole funktioniert. Dieses Experiment veranschaulicht den genauen Vorgang, wenn man mit Wasser eine Kerze oder einen Brand löscht. Dazu stellt man die Kerze auf den Tisch, zündet sie an, zielt auf den Docht und spritzt diese mit dem Feuerlöscher wieder aus. Auf keinen Fall auf den Napf zielen, da ansonsten das flüssige Wachs verschüttet wird. Zudem kann es passieren, dass sich dabei der Docht mit Wasser vollsaugt, was die Kerze vorübergehend unbrauchbar machen kann. Warum erlischt die Kerze oder ein Brand bei Wasserwirkung und aus welchem Grund kann man trotzdem mit Wasser nicht alles löschen?

Physikalische Erklärung:

Wie zu Beginn des Kapitels bereits beschrieben, braucht man bestimmte Umstände um eine Flamme zu löschen. Entweder man unterbricht der Flamme die Sauerstoffzufuhr oder man entzieht der Flamme die Wärme bis sie erlischt. Beim Kontakt mit Wasser passiert beides. Zum einen entzieht das Wasser der Flamme,

Wärme und zum anderen verdampft das Wasser bei Bränden und verdrängt somit die Umgebungsluft und die Sauerstoffzufuhr wird unterbrochen. Grundsätzlich sollte man Kerzen nicht mit Wasser löschen und dieser Versuch gilt nur als Demonstrationsversuch.

Sicherheitshinweis:

Auf keinen Fall darf man Ölbrände mit Wasser löschen (Experiment 9). Das Wasser verdampft schlagartig durch die hohe Brenntemperatur von Öl, reißt es kleine Öltröpfchen mit sich und es kommt zu einer explosionsartigen Stichflamme. Ölbrände löscht man grundsätzlich durch Ersticken der Flamme. Um klassische Herdbrände zu löschen, eignen sich hierfür am besten ein Deckel, oder ein Geschirrtuch, um die Flamme zu ersticken.

18.13. Experiment 84: Kerzenlöschspirale und Kerzenlöscher Glocke

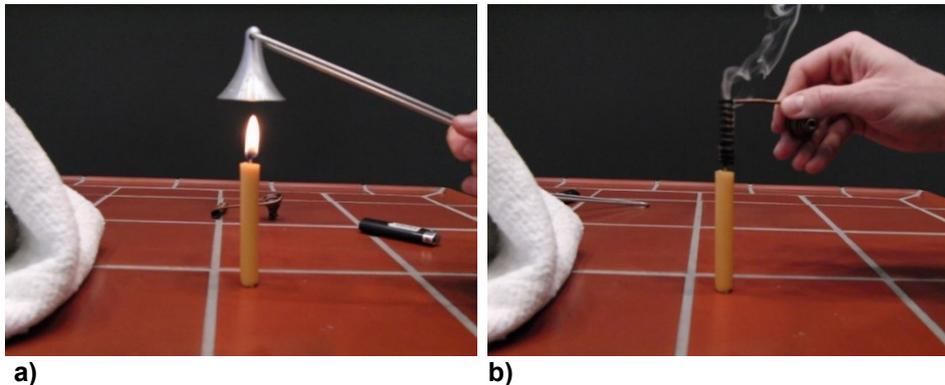


Abb. 128 a, b: a) Kerzenlöscher Glocke b) Kerzenlöschspirale

Material:

- 1 x Rolle Kupferdraht (Durchmesser 2 mm)
- Bleistift oder Kugelschreiber
- Kerzenlöscher Glocke
- Kerze

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Als Erstes wickelt man den Kupferdraht ähnlich einer Spule um den Stift (circa zehn Windungen). Danach entfernt man den Stift und zieht den gewickelten Draht etwas auseinander, sodass eine Spirale entsteht. Nach dem Anzünden der Kerze hält man die Spirale gerade über die Flamme und den Docht. Nach kurzer Zeit erlischt die Flamme. Die Kerze wird erneut entzündet und man löscht diese anschließend durch das Aufsetzen der Kerzenlöscher Glocke erneut aus.

Physikalische Erklärung:

Der Grund warum die Flamme erlischt, liegt daran, dass dem System Hitze entzogen wird. Obwohl nach wie vor Brennstoffe und Sauerstoff vorhanden sind, genügt es nicht um die Flamme aufrecht zu erhalten. Dies geschieht durch den Kupferdraht, der eine Wärmeleitfähigkeit von ungefähr $\lambda = 400 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ aufweist (vgl. Kuchling, 2014, S. 644). Zum Vergleich weist Wasser 0,6 und Luft gar nur $0,026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ auf (Experiment 20). Bei der Kerzenlöscher Glocke bedient man sich dem Entziehen des Sauerstoffs. Unter der Glocke wird dieser verbraucht und Kohlendioxid entsteht dabei als Verbrennungsprodukt. Schon nach kurzer Zeit erlischt deswegen die

Flamme. Zusätzlich wird dem System aufgrund der Wärmeleitfähigkeit der Glocke Hitze entzogen, was den Vorgang des Auslöschens fördert.

Bemerkung:

Die hohe Wärmeleitfähigkeit macht sich auch für die experimentierende Person bemerkbar, indem der Draht sehr schnell heiß wird. Deshalb empfiehlt es sich die Spirale mit der Rolle verbunden zu lassen, was die Finger schützen soll, oder aber man verwendet einen etwas dickeren Draht, wie im oben angeführten Experiment.

18.14. Experiment 85: Kerze auslöschen mit Airbag

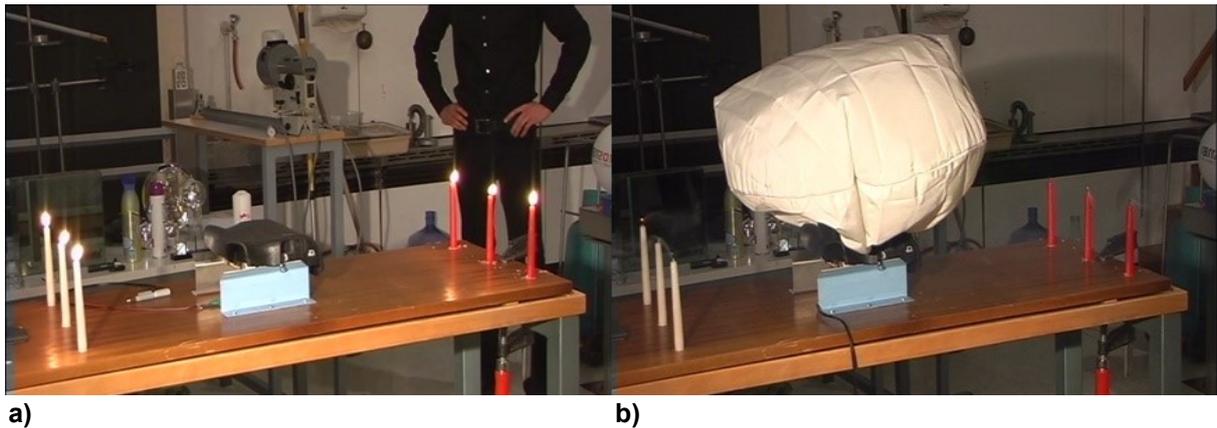


Abb. 129 a, b: a) Versuchsaufbau Airbag b) Ausgelöster Airbag (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Airbag aus Altauto
- sechs Kerzen
- Holzplatte
- Netzteil (12 V)
- Material zum Fixieren

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Grundsätzlich ist es kaum möglich einen funktionierenden Airbag aus einem Altauto zu bekommen. Herr Prof. Pottlacher hatte jedoch nach Absprache mit einer KFZ-Werkstatt die Möglichkeit, gleich mehrere ausgebaute Airbag Systeme aus ausrangierten Fahrzeugen zu erstehen. Wie in Abb. 130 a zu sehen, wird der ausgebaute Airbag mittels Aluminiumschienen auf der Holzplatte fix montiert und die Kerzen in einem Abstand von ungefähr 30 – 50 cm positioniert. Um den Airbag stabil und ohne Gefahr auszulösen, ist bei der Fixierung des Airbags auf die Holzplatte, sowie beim Befestigen derselben, größte Sorgfalt geboten. Die Verbindung zum 12 V Netzteil erfolgt mittels herkömmlichen Kabeln, welche aus dem Laborfundus stammen. Vor dem Zünden warnt man vor allem das Publikum vor dem lauten Knall, welcher folgen wird. Vorausgesetzt es fließt genügend hoher Strom aus dem Netzteil, bläht sich der Airbag nach der Zündung schlagartig auf und die Kerzen erlöschen.

Physikalische Erklärung:

Der elektrische Impuls wird zum sogenannten Brückenzünder geleitet, der anschließend die Glühpille und letztendlich den Festtreibstoff zündet. Der Brückenzünder besteht unter anderem aus einem feinen Draht, welcher sich aufgrund des elektrischen Impulses rasch erwärmt. Diese Wärme reicht bereits aus, um den Initialsprengstoff, meistens Schwarzpulver, zu zünden. Im letzten Schritt folgt die Umsetzung des Festtreibstoffs, auf Basis von Natriumacid (NaN_3) in Tablettenform. Folglich kommt es zu keiner Explosion, sondern zu einem sehr raschen kontrollierten Abbrennen der Tabletten. Dieser Vorgang bringt eine immense Expansion des entstehenden Gases, in dem Fall Stickstoff, mit sich. Dies führt dazu, dass sich die Haut des Airbags aufbläht. Durch das schlagartige Verdrängen der umgebenden Luftmassen, werden diese beschleunigt und löschen die in der Nähe befindlichen Kerzen aus.

Bemerkung:

Die bei der Verbrennung entstehende Hitze (600 – 800 °C) und Verunreinigung wird mittels Metallfilter auf rund 300 °C heruntergekühlt, ehe das Füllgas Stickstoff mit rund 60 - 80 °C im Luftsack landet. Der hohe Expansionsdruck von rund 120 bar ist jedoch sehr wohl gefährlich für den Menschen, was unter anderem gebrochene Nasen zur Folge haben kann. Auch das Gehör wird durch den lauten Knall nicht beschädigt. Der beachtlich hohe Schalldruckpegel von 130 - 160 dbA dauert nur ungefähr 3 ms, was eine zu geringe Wirkzeit ist, um das Gehör dauerhaft zu schädigen. Wie bei allen technischen Geräten können auch hier Fehlfunktionen auftreten, wie etwa zu heißes Gas oder schwerwiegendere Verletzungen aufgrund eines Körperteils oder Fremdkörper zwischen dem Lenkrad und dem Menschen. Diese Risiken sind jedoch in Anbetracht der Zahl der geretteten Personen vertretbar (vgl. Wiesinger, 2015). Das Auslösen eines elektrischen Impulses erfolgt im Fahrzeug mittels Beschleunigungssensoren. Waren sie zu Beginn, aus Federn und Gewichten konstruiert, noch mechanisch, detektieren moderne Systeme mittels Körperschallmikrofonen die Parameter des Aufpralls und veranlassen so die Zündung. Entgegen der Meinung, ein Airbag kann bei abgeklemmter Batterie nicht auslösen, sei hier erwähnt, dass die nötige elektrische Energie dazu aus starken Kondensatoren rührt, welche als Energiespeicher dienen (vgl. Borgeest, 2013, S. 386).

18.15. Experiment 86: Kerze in Wasserstoff



Abb. 130: Beim Einführen der Kerze in den mit Wasserstoff gefüllten Zylinder
(<http://netexperimente.de/chemie/82.html>)

Material:

- Kunststoffzylinder transparent
- Wasserstoff aus Druckflasche
- Kerze
- Klebeband
- Bambusstab
- Stativmaterial

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Der transparente Kunststoffzylinder wird mittels Stativmaterial so fixiert, dass er mit der Öffnung nach unten fest eingespannt wird. Die Kerze befestigt man mit Klebeband an einem Bambusstab. Sind die Vorbereitungen beendet, dringt man mit dem Schlauch von der Gasflasche bis ganz nach oben in den Glaszylinder ein und lässt bei geringem Druck den Wasserstoff einströmen. Unter langsamem Herausziehen entfernt man den Schlauch, ehe man darauf den Gashahn schließt. Schließlich wird die Kerze angezündet, mit ausreichend Sicherheitsabstand mittels Stab in den Zylinder eingeführt und anschließend wieder herausgezogen. Nach einem leisen Knall kurz vor der Zylinderöffnung erlischt die Kerze, sobald sie sich vollständig im Zylinder befindet. Zieht man sie daraufhin heraus, beginnt sie wieder zu brennen.

Physikalische Erklärung:

Aufgrund der Normdichte von rund $0,09 \text{ kg/m}^3$, ist Wasserstoff um vieles leichter als Luft, was es möglich macht, dass dieser im verkehrten Zylinder eingeschlossen bleibt (vgl. Kuchling, 2014, S. 616). Beim Einfüllvorgang wird die Luft aus dem Gefäß verdrängt. Der leise Knall, bedingt durch eine kleine Explosion, entsteht aufgrund der Vermischung beider Gase an der Grenzschicht des Zylinders (gleicher Effekt wie in Experiment 64). Für den Verbrennungsvorgang benötigt die Kerze unter anderem Sauerstoff (Kapitel 7). Auch Wasserstoff benötigt den Reaktionspartner Sauerstoff um zu reagieren. Das Erliegen, beziehungsweise Nicht-Einsetzen der Prozesse ist darauf zurückzuführen, dass sich kein Sauerstoff im Zylinder befindet. Betrachtet man die Öffnung genauer, so stellt man fest, dass nach der anfänglichen kleinen Explosion, kontinuierlich eine kleine Flamme lodert. Diese macht es möglich, dass sich der Docht beim Herausziehen wieder entzündet. Der Vorgang des Rein- und Rausziehens kann solange wiederholt werden, bis der darin befindliche Wasserstoff verbraucht ist (vgl. Sommer, 2016).

Bemerkung:

Es ist darauf zu achten, dass dieses Experiment an einem windgeschützten Ort durchgeführt wird, damit sich die Gase nicht durchmischen.

Sicherheitshinweis:

Im Umgang mit dem hoch reaktiven Gas Wasserstoff ist höchste Vorsicht geboten und sollte daher nur von Fachpersonal durchgeführt werden. Das Tragen von Schutzausrüstung, wie Schutzbrille und Schutzhandschuhen wird empfohlen.

18.16. Experiment 87: Vortexkanone



Abb. 131: Vortexkanone (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Trinkwasserspenderbehälter
- fünf Kerzen
- ein Rauchball

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die fünf Kerzen werden in einem Abstand von ungefähr 3 cm nebeneinander aufgestellt und angezündet. Nach dem Zünden eines farbigen Rauchballs (Silvesterpyro), wird dieser in den Behälter geworfen und man wartet noch kurz bis er zu qualmen beginnt. Dann zielt man, mit einem Abstand von ungefähr 2 m, mit der Öffnung des Behälters auf eine der Kerzenflammen und klopft dabei fest mit einer Hand auf den Behälterboden. Es treten aus der Öffnung Rauchringe aus, welche sich bis zur Flamme hin ausbreiten. Wird die Flamme getroffen so erlischt diese. Den Vorgang des Zielens und Klopfens wiederholt man so lange bis alle Kerzenflammen erloschen sind.

Physikalische Erklärung:

Beim Handschlag auf den Boden des Behälters wird dieser kurz eingedrückt was dazu führt, dass sich sein Volumen verringert. Dies hat zur Folge, dass ein Teil des darin befindlichen Gases, in dem Fall, das Luft-Rauch Gemisch, komprimiert wird und entweicht. Wenn man den Querschnitt der Öffnung betrachtet haben die austretenden Luftmassen aufgrund der Viskosität unterschiedliche Geschwindig-

keiten. Dies liegt daran, dass die der Wand nächste Schicht durch Reibungskräfte gebremst wird. Die Luftschichten wirken ebenso untereinander, was dazu führt, dass der Effekt der Reibung zum Zentrum hin immer schwächer wird und dort somit die größten Strömungsgeschwindigkeiten zu verzeichnen sind (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2009, S. 395). Die Luft fließt somit außen langsamer als innen. Als Folge dieses Ungleichgewichts bildet sich ein Wirbel, welcher abreißt, wenn der Luftstrom endet und sich geradlinig von der Öffnung wegbewegt. Die kinetische Energie der rotierenden Luftteilchen wird auf dem Weg zur Kerzenflamme nach und nach an die umgebende Luft abgegeben. Trifft ein solcher Vortexring auf eine Kerzenflamme, ist er in der Lage diese auszulöschen. Dabei wird zum einen die Brennmassenzufuhr unterbrochen, andererseits die Umgebungsluft heruntergekühlt (vgl. Steinwender, 2012, S. 101).

Bemerkung:

Um besser Zielen zu können, wurde der Rauchball verwendet. Die Wirbel- oder Vortexringe werden so für den Schützen sichtbar gemacht. Wird der Abstand zur Flamme zu groß gewählt, lösen sich die Ringe auf dem Weg dorthin bereits auf. Für etwaige Aufnahmen der Ringe empfiehlt es sich, diese von vorne zu beleuchten und vor dunklem Hintergrund zu fotografieren.

18.17. Experiment 88: Kerze unter drei Gläsern unterschiedlicher Größe

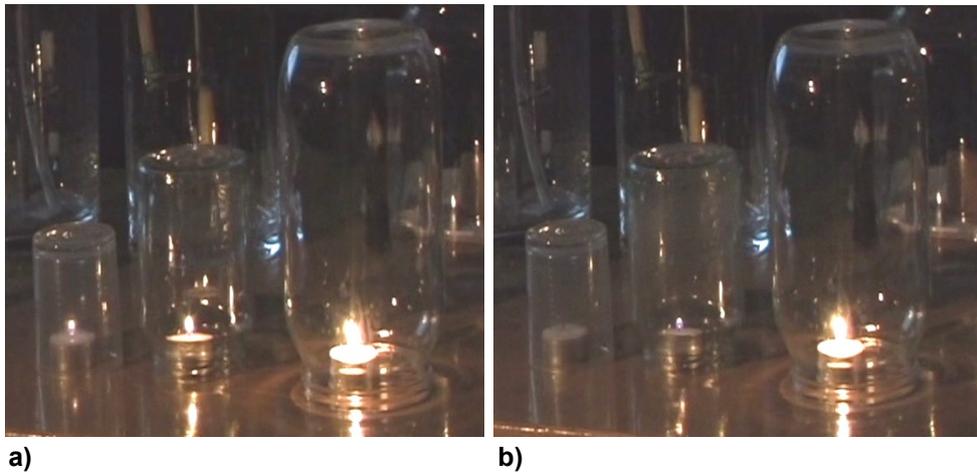


Abb. 132 a, b: a) Versuchsaufbau b) Nur zwei Kerzen brennen noch (Weihnachtsvorlesung 2012)

Material:

- Kerzen (3 x gleich groß)
- Gläser (3 x verschieden hohe Gläser)

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Die drei Kerzen werden nebeneinander auf den Tisch gestellt und angezündet. Möglichst zeitgleich werden anschließend die drei unterschiedlichen Gläser auf die Kerzen gestellt. Zuerst erlischt die Kerze unter dem das Glas mit dem kleinsten Volumen, anschließend jene Kerze unter dem Glas mittleren Volumens und zum Schluss jene unter dem Glas mit dem größten Volumen.

Physikalische Erklärung:

Die Erklärung zu diesem Experiment ist sehr simpel. Die Kerze, auf dem das Glas mit dem kleinsten Volumen steht, erstickt zuerst. Unter diesem Glas befindet sich am wenigsten Sauerstoff zur Verbrennung.

Bemerkung:

In der Umgebungsluft sind etwa 21 % an Sauerstoff enthalten. Wenn dieser für die Verbrennung notwendige Sauerstoff in einem geschlossenen System verbraucht wurde, erstickt die Kerze.

18.18. Experiment 89: Auslöschen einer Kerzenflamme mittels Polarisationsfilter

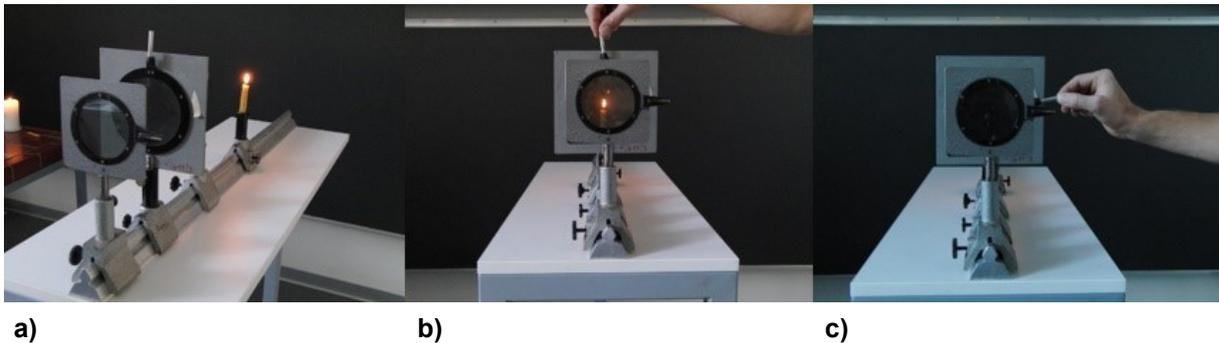


Abb. 133 a, b, c: Polarisieren des Kerzenlichts a) Versuchsaufbau b) Parallele Polarisations Ebenen c) Polarisations Ebenen 90° zueinander

Material:

- zwei Polarisationsfilter (linear)
- Kerze

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Dieser Versuch dient der Demonstration eines Effekts und löscht die Kerzenflamme nur scheinbar aus. Nach dem Entzünden der Kerze hält man einen Polarisationsfilter vor die Flamme. Durch die transparente Kunststoffeinlage erscheint die Flamme etwas dunkler. Anschließend setzt man einen zweiten Polarisationsfilter darauf, sodass sich die jeweiligen weißen Markierungsstriche überlappen. Das Bild erscheint noch dunkler. Jetzt dreht man einen der Filter langsam in eine Richtung. Das Bild wird immer dunkler, ehe es bei einem Winkel von 90° ganz verschwindet.

Physikalische Erklärung:

Das Phänomen, auf das sich dieses Experiment stützt, nennt sich Polarisation. Das von der Kerzenflamme ausgesandte, natürliche, unpolarisierte Licht trifft dabei auf den ersten Filter, den Polarisator, welcher nur elektromagnetische Wellen einer bestimmten Schwingungsebene passieren lässt. Natürliches Licht ist unpolarisiert und nur ein Teil dessen schwingt in der vorgegebenen Ebene. Der senkrecht zur Polarisations ebene schwingende Teil wird absorbiert und das Bild erscheint dunkler. Das auf das Auge fallende Licht ist jetzt linear polarisiert besitzt eine geringere Intensität I_1 . Setzt man einen zweiten Filter, den Analysator, mit selbiger Orientierung davor, wird die Transmission erneut schwächer. Beim Drehen des Filters werden nun

nach und nach sowohl die horizontalen als auch vertikalen Anteile des Lichts herausgefiltert, was dazu führt, dass bei einem Winkel von 90° zwischen den beiden Filtern kein Licht mehr transmittiert wird. Die Kerze wird somit scheinbar ausgelöscht. Die Intensität I_2 des vom zweiten Filter kommenden Lichts ist über das Malus'sche Gesetz definiert:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta \quad (18.1)$$

Wobei θ der Winkel zwischen den Transmissionsachsen von Polarisator und Analysator ist (vgl. Tipler, Mosca, Wagner, 2009, S. 1025).

Bemerkung:

Die in Polarisationsfiltern verwendete Folie besteht aus Kunststoff, genauer gesagt aus Zellulosehydrat. Bei Streckung in eine gewisse Richtung, werden die darin befindlichen langkettigen Moleküle ausgerichtet, was die Eigenschaft der Polarisation zur Folge hat. Nachteil bei Polarisationsfolien ist das große Absorptionsvermögen. Bei großen Lichtintensitäten, wie sie beispielsweise bei Lasern vorkommen, kann dies leicht zu Verbrennungen der Folie führen. (vgl. Demtröder, 2008, S. 253 - 255). Die Technik der Polarisation spielt vor allem in der Fotografie, der Herstellung von Bildschirmen oder der Spannungsoptik eine große Rolle.

18.19. Experiment 90: Cola Mentos Fontäne



Abb. 134: Cola Mentos Fontäne

Material:

- Kerze
- Draht
- 2 l Coca Cola light Flasche
- Packung Mentos
- Blatt Papier/Bierdeckel

Vorbereitung und Versuchsdurchführung:

Vorab empfiehlt es sich, das Experiment nur in sehr hohen Räumen mit ausreichend Platz durchzuführen. Die Kerze wird in ca. 3 m Höhe, umwickelt mit einem Draht angebracht. Sollte man sich draußen befinden, kann ein Baum oder ähnliches als Aufhängepunkt dienen. Die Cola light Flasche wird nun so positioniert, dass genau darüber die Kerze hängt. Nun nimmt man ein Blatt Papier, rollt es so zusammen, dass dazwischen die Mentos Platz haben. An der unteren Seite hält man einen Bierdeckel oder Ähnliches, sodass man diesen schnell wegziehen kann, damit die Mentos etwa alle gleich schnell in die Flasche fallen. Es gibt noch viele Möglichkeiten eine solche Vorrichtung zu bauen. So funktioniert dies auch mit einem Faden, welcher durch alle Mentos hindurchgeht und anschließend in die Flasche fallen gelassen wird. Bei diesem Experiment wurde eine verschraubbare Vorrichtung genommen, die im Durchmesser kleiner als der Flaschenhals ist, um so eine noch höhere Fontäne zu erzeugen. Allgemein kann man sagen, je mehr Mentos, desto

besser funktioniert das Experiment. Treten die Mentos mit dem Cola in Kontakt, entsteht eine Fontäne, welche bei richtiger Positionierung der Kerze, diese auslöscht.

Physikalische Erklärung:

Bei der Schaumfontäne handelt es sich nicht um eine chemische Reaktion zwischen dem Mentos und dem Cola, sondern um eine rein physikalische Reaktion. In einem Erfrischungsgetränk, wie bei unserem Experiment das Cola light, befindet sich Kohlendioxid. Bei geschlossener Flasche ist das Kohlendioxid gelöst in sehr kleinen Bläschen, da der Druck im Inneren der Flasche verhindert, dass sich größere Bläschen bilden können. Beim Öffnen schließen sich diese zu immer größeren Bläschen zusammen, bis der Auftrieb der Bläschen groß genug ist, diese aufsteigen und dadurch noch weitere Bläschen mitreißen. Durch Hinzufügen eines Mentos beschleunigt sich dieser Prozess enorm. Unter genauerer Betrachtung des Mentos unter einem Mikroskop wird dieses näher beleuchtet. Mag sich das Mentos in der Hand glatt anfühlen, so kann man unter dem Mikroskop winzige Löcher und Krater erkennen, welche perfekte Nukleationspunkte darstellen. Nukleationspunkte sind Punkte wo sich die Bläschen bilden können. Diese bilden sich bei Vertiefungen, Rissen oder kleinen Löchern. In der Gastronomie werden diese Nukleationspunkte gezielt gemacht, um so wie bei bestimmten Biergläsern, die Bläschen in Form einer Treppe aufsteigen zu lassen. Bläschen in einer Flasche entwickeln sich dadurch, indem diese winzige Vertiefungen an der Flaschenwand oder Flaschenboden ausnutzen, um sich zu immer größeren Bläschen zu vereinen um dann irgendwann aufzusteigen. Beim Mentos steigen die Bläschen nicht nur nach oben, sondern schießen regelrecht hinauf und reißen weitere Bläschen und auch Flüssigkeit mit sich, welche sich dann in einer Fontäne entladen. Im Endeffekt wird der Kerze durch die dabei entstehende Fontäne ausgelöscht (vgl. Zobel, 2016), siehe Experiment 83.

Bemerkung:

Dieses Experiment muss nicht unbedingt mit einer Cola Flasche durchgeführt werden, sondern es genügt auch ein anderes Erfrischungsgetränk, welches genug Kohlensäure enthält um eine Fontäne zu erzeugen. Als weiterführendes Experiment könnte, durch Hinzuziehen unterschiedlicher Getränke und dementsprechenden Kohlensäuregehalt beobachtet werden, bei welchem die höchste Fontäne erzeugt wird.

19. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Kerze (Pixabay).....	3
Abb. 2: Dochtschere mit Auslöschschere.....	8
Abb. 3 a, b, c: Bienenwachskerze Rollen a) Docht eindrücken b) Wachsplatte rollen c) Fertige Bienenwachskerze	11
Abb. 4: Tauchen einer Paraffinwachskerze (Weihnachtsvorlesung 2012)	15
Abb. 5: Gießen von Kerzen (Weihnachtsvorlesung 2012)	18
Abb. 6: Rohstoffe der Kerzenherstellung (Matthäi & Petereit 2003, S. 6).....	21
Abb. 7: Anteil Kerzenrohstoffe (Matthäi & Petereit 2003, S. 7)	21
Abb. 8 a, b: Dichte Paraffin und Wasser im Vergleich a) Festes Paraffin sinkt in flüssigen Paraffin zu Boden b) Eis schwimmt im Wasser an der Oberfläche (Weihnachtsvorlesung 2012).....	23
Abb. 9: Temperaturabhängigkeit des Volumens von 1 g Wasser (Tipler, Mosca, Wagner, 2009, S. 373).....	24
Abb. 10: Tafelkreide als Docht.....	28
Abb. 11: Verbrennungsdreieck	29
Abb. 12: Eisschicht am Schöpflöffel (Weihnachtsvorlesung 2012).....	31
Abb. 13: Ruß am Stäbchen	32
Abb. 14 a, b, c, d: Die verschiedenen Aggregatzustände inklusive blauer Flamme (Bunsenbrenner) a) Fest b) Flüssig c) Gasförmig d) Plasma (Weihnachtsvorlesung 2012).....	33
Abb. 15 a, b, c: Fettbrand a) Brennendes Paraffin b) Stichflamme nach Löschung mit Wasser c) Flammenwolke (Weihnachtsvorlesung 2012)	35
Abb. 16: Flamme ersticken	36
Abb. 17: Die Vier Flammenzonen (Matthäi & Petereit, 2003, S. 18)	37
Abb. 18: Wachsdampf in Gefäß einleiten	39
Abb. 19: Brennende Holzkohle	41
Abb. 20: Mandelform der Flamme (pixabay).....	43
Abb. 21: Aufnahme Wärmebildkamera (FLIR T360)	44
Abb. 22 a, b: Kerze in Rezipient a) Vor Absaugen der Luft b) Im Vakuum	46
Abb. 23: Weltraumkerze (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Candlespace.jpg)	47
Abb. 24: Spektrum Kerzenlicht (UPRtek MK350N)	48
Abb. 25: Die Schwarzkörperstrahlung (Luerßen, Peppler, Ries, Janek, Over, 2015, S. 368).....	49
Abb. 26: Spektrum einer Kerze auf einer CD	50
Abb. 27: Zweite Flamme brennt (Weihnachtsvorlesung 2012).....	51

Abb. 28 a, b: Grubenlampe a) Zweite Version der Davy'schen Sicherheitslampe	
b) Weiterentwicklung mit Glaszylinder und Kerze (Repetzki, 1973, S. 48 - 51).....	52
Abb. 29 a, b, c: Schwimmende Kerze a) Labiles Gleichgewicht b) Übergangsphase	
c) Stabiles Gleichgewicht (Weihnachtsvorlesung 2012)	53
Abb. 30 a, b: Stabilität eines schwimmenden Körpers a) Gleichgewichtslage	
b) Verkippung mit auftretenden Momenten (Demtröder, 2008, S. 184).....	54
Abb. 31: Kerze unter Wasser (Weihnachtsvorlesung 2012).....	55
Abb. 32: Herkömmliche Schwimmkerze (Schlichting, 1994, S. 1).....	56
Abb. 33: Diffusionsvorgang in Festkörpern (Paraffin)	57
Abb. 34: Selbstgebauter Wasserkocher	59
Abb. 35: Ballon unter Flamme (Weihnachtsvorlesung 2012)	60
Abb. 36: Nachweis Flammenzone	62
Abb. 37: Schlieren (Schlichting, 2011, S. 41).....	64
Abb. 38: Brechung in der Atmosphäre.....	65
Abb. 39 a, b: a) Kerze nach dem Tieffrieren b) Tiefgefrorene Kerze brennt.....	66
Abb. 40: Gefrorene spröde Kerze im Vergleich mit herkömmlicher Kerze	67
Abb. 41: Kerzenkarussell (Weihnachtsvorlesung 2012).....	68
Abb. 42: Windmühle zum Entwässern der Reisfelder aus China (Hau, 2008, S. 3)	69
Abb. 43: Windmühle zum Getreidemahlen aus Afghanistan (Hau, 2008, S. 2)	69
Abb. 44: Aufwindkraftwerk (Hau, 2008, S. 75)	69
Abb. 45 a, b, c: Brennender Teebeutel a) Beim Zünden b) Während dem Brennen	
c) Die Reste des Teebeutels steigen auf.....	70
Abb. 46: Hefnerkerze	72
Abb. 47: Aufbau Hefnerkerze	
(https://de.wikipedia.org/wiki/Hefnerkerze#/media/File:Hefnerlampe.png).....	73
Abb. 48: Farbhufeisen mit Kerzen (Weihnachtsvorlesung 2012)	74
Abb. 49: Farbhufeisen (Priese, 2015, S.40).....	75
Abb. 50: Aufbau zu Spektrum einer Kerze.....	76
Abb. 51: Spektrum einer Kerze.....	77
Abb. 52: Farbort der Kerzenflamme im Planck'schen Kurvenzug	77
Abb. 53: Korona einer Kerze (Schlichting, 2009)	78
Abb. 54 a, b, c: Ampelflamme a) Grüne Flamme b) Gelbe Flamme,	
c) Rote Flamme (Weihnachtsvorlesung 2012).....	79
Abb. 55 Brennendes Zündholz (pixabay).....	81
Abb. 56: Hüpfende Flamme (Weihnachtsvorlesung 2012).....	83
Abb. 57: Kerze im Fokus eines Hohlspiegels (Weihnachtsvorlesung 2012).....	85

Abb. 58: Brennweite f für achsenferne Strahlen kleiner als für achsennahe Strahlen (Demtröder, 2012, S. 277).....	86
Abb. 59: Parabolrinne (Scholz, 2013, S. 56).....	87
Abb. 60: Kerze im Fokus einer Linse	88
Abb. 61: Laserstrahl trifft Kerze (Weihnachtsvorlesung 2012)	90
Abb. 62: Brennende Kerze mit elektrischer Entladung an der Seitenwand	92
Abb. 63: Plasmaball erzeugt durch Mikrowellen	94
Abb. 64: Versuchsaufbau Hochspannungstransformator mit Kerze (Weihnachtsvorlesung 2012).....	96
Abb. 65: Gespiegelter Adventkranz (Weihnachtsvorlesung 2012)	99
Abb. 66: Ebener Spiegel (Hecht, 2009, S.295)	100
Abb. 67: Kranz mit Sieben Kerzen (Weihnachtsvorlesung 2012)	100
Abb. 68: Unendlich viele Teelichter (Weihnachtsvorlesung 2012).....	101
Abb. 69: Spiegelung an Christbaumkugeln (Weihnachtsvorlesung 2012).....	102
Abb. 70: Spiegelung nach oben gekrümmt (Weihnachtsvorlesung 2012)	102
Abb. 71: Schusterkugel	103
Abb. 72: Strahlengänge Konkavlinse (Hecht, 2009, S. 273)	104
Abb. 73: Scheinbar geknickte Kerze (Weihnachtsvorlesung 2012).....	105
Abb. 74 a, b: Flamme mit und ohne Schatten a) Flammen im weißen Licht b) Flamme bestrahlt von Natriumdampflampe (Weihnachtsvorlesung 2012).....	107
Abb. 75: Feuerwerk (pixabay).....	108
Abb. 76 a, b: a) Kerze hinter Glas b) Hinter Siliziumscheibe.....	109
Abb. 77 a, b: a) Multispektralbrille b) Bild durch Brille	111
Abb. 78: Trichterströmung (Weihnachtsvorlesung 2012)	112
Abb. 79 a, b: Luftzug bei Türspalt a) Oberhalb b) Am Boden (Weihnachtsvorlesung 2012).114	
Abb. 80: Schema Luftzug bei Türspalt (Zürcher & Frank, 1998, S. 80).....	115
Abb. 81: Bernoulli Effekt (Weihnachtsvorlesung 2012)	116
Abb. 82: Formel 1 Wagen mit Spoiler (pixabay)	117
Abb. 83: Kerze vor Lautsprecher	118
Abb. 84: Kurven gleicher Lautstärkeempfindungen als Funktion der Frequenz zur Lautstärke (Tipler, Mosca, Wagner, 2015, S. 472).....	119
Abb. 85 a, b: Elektrischer Wind a) Versuchsaufbau b) Neigung der Kerze	120
Abb. 86: Schema Van de Graaf Generator (Demtröder, 2013, S. 19).....	121
Abb. 87: Elektroskop (http://www.lehrmittel-shop.de/cornelsen_experimentam:104/elektroskop_nach_braun_anzeigegeraet_fuer_versuche_zur_elektrostatik-39984.html).....	123
Abb. 88 a, b: Kerze im Plattenkondensator a) Versuchsaufbau b) Neigung der Kerze	124

Abb. 89: Kerze am Drehschemel.....	126
Abb. 90: Kerzenwippe (Weihnachtsvorlesung 2012)	128
Abb. 91: Kerzenkranz als Tiefdruckgebiet (Weihnachtsvorlesung 2012)	130
Abb. 92: Aufbau Rubensrohr (Weihnachtsvorlesung 2012)	132
Abb. 93: Stehende Welle am Rubensrohr (Weihnachtsvorlesung 2012).....	133
Abb. 94: Kundtsche Rohr (Demtröder, 2008, S. 398)	133
Abb. 95 a, b: Schuss einer Kerze a) Gefrorene Kerze b) Tiefgefrorene Kerze (-196 °C) (Weihnachtsvorlesung 2012).....	134
Abb. 96: Tornado (http://www.naklar-magazin.de/natur/umwelt/artikel/items/ faszinierende-naturgewalt-tornado.html)	135
Abb. 97 a, b, c: Wachsflammenwerfer a) Aufheizen des Wachses b) Reaktion mit Wasser c) Feuerwolke (Weihnachtsvorlesung 2012).....	136
Abb. 98 a, b, c: Implodierende Getränkedose a) Aufheizen der Dose b) Überkippen ins kalte Wasser c) Zerdrückte Dose.....	138
Abb. 99 a, b: Feuerball mit Lycopodium a) Brennende Fackel b) Lycopodium Flamme (Weihnachtsvorlesung 2012).....	140
Abb. 100: Feuerspucker (pixabay).....	141
Abb. 101: Flammenwerfer mit Haarspray (Weihnachtsvorlesung 2012).....	142
Abb. 102: Aus Stickstoff basierender Haarspray (Weihnachtsvorlesung 2012).....	143
Abb. 103 a, b: Benzinbrandkerze a) Aufbau b) Benzinbrand (Weihnachtsvorlesung 2012) .	144
Abb. 104 a, b: Benzinbrände mit Wasser löschen a) Benzinbrand b) Mit Wasser besprüht .	145
Abb. 105: Brennende Wunderkerzen unter Wasser.....	146
Abb. 106 a, b: a) Anordnung der Methan- und Wasserstoffballons b) Ablauf Kettenreaktion (Weihnachtsvorlesung 2012).....	148
Abb. 107 a, b: a) Abgezapfter flüssiger Sauerstoff b) Glimmender Docht brennt auf (Weihnachtsvorlesung 2012).....	150
Abb. 108 a, b, c: a) Flamme mit Orangenschale b) Zerdrücken der Orange c) Lichtblitze..... (Weihnachtsvorlesung 2012).....	152
Abb. 109 a, b: a) Schaum beim Entzünden b) Skizze des gebogenen Rohrs (Weihnachtsvorlesung 2012).....	153
Abb. 110: Brennender Magnesiumspan	155
Abb. 111: Brennender Schneeball.....	157
Abb. 112: Brennender 10 Euroschein.....	159
Abb. 113: Flaschengeist (Weihnachtsvorlesung 2012)	161
Abb. 114 a, b: Auslöschen eines Kerzenkranzes mit Stickstoff a) Versuchsaufbau b) Auslöschung durch Explosion (Weihnachtsvorlesung 2012)	164

Abb. 115: Essbare Kerze (http://www.science.lu/de/content/die-essbare-kerze-%E2%80%93-der-ideale-anfang-%C3%BCr-ein-perfektes-dinner).....	166
Abb. 116: Kerzen mit Kohlendioxid löschen (Weihnachtsvorlesung 2012).....	167
Abb. 117: Auslöschen über Atemluft.....	169
Abb. 118: Kerze mit Mineralwasser löschen	170
Abb. 119: Kerze mit flüssigen Stickstoff löschen	171
Abb. 120: Kerzen hinter Flaschen ausblasen	172
Abb. 121: Entstehung von Wirbeln (Demtröder, 2008, S. 248)	173
Abb. 122: Umströmung eines Körpers (Siekamann & Thamsen, 2007, S. 204).....	174
Abb. 123 Scherzkerzen (http://www.firlefantastisch.de/Scherzkerzen)	175
Abb. 124 a, b: Kerzenaquarium a) Noch brennende Kerzen b) Obere Kerze erstickt (Weihnachtsvorlesung 2012).....	176
Abb. 125 a, b: Kerzenlift a) Vor Versuch b) Nach dem Versuch (Weihnachtsvorlesung 2012).....	177
Abb. 126 a, b, c: a) Versuchsaufbau b) Ei wird eingesogen c) Ei in Flasche.....	179
Abb. 127: Scherzfeuerlöscher	180
Abb. 128 a, b: a) Kerzenlöscher Glocke b) Kerzenlöschspirale.....	182
Abb. 129 a, b: a) Versuchsaufbau Airbag b) Ausgelöster Airbag (Weihnachtsvorlesung 2012).....	184
Abb. 130: Beim Einführen der Kerze in den mit Wasserstoff gefüllten Zylinder (http://netexperimente.de/chemie/82.html)	186
Abb. 131: Vortexkanone (Weihnachtsvorlesung 2012)	188
Abb. 132 a, b: a) Versuchsaufbau b) Nur zwei Kerzen brennen noch (Weihnachtsvorlesung 2012).....	190
Abb. 133 a, b, c: Polarisieren des Kerzenlichts a) Versuchsaufbau b) Parallele Polarisationsebenen c) Polarisationssebenen 90 ° zueinander	191
Abb. 134: Cola Mentos Fontäne	193

20. Literaturverzeichnis

Angeletti, C. (1980). *Geformtes Wachs, Kerzen Votive Wachsfiguren*. 1. Aufl. München: Callway Verlag.

Bartknecht, W. (1987). *Staubexplosionen, Ablauf und Umgang*. Berlin: Springer-Verlag.

Berger, R. (1. Mai 2016). *Physikdidaktik UNI Osnabrück*. Von http://www.physikdidaktik.uni-osnabrueck.de/fileadmin/user_upload/Artikel%20Berger/Berger2002a.pdf abgerufen

Berthold, K., & Ludwig, A. (18. Mai 2016). *PatentDE*. Von <http://www.patent-de.com/20070308/DE202006016915U1.html> abgerufen

Borgeest, K. (2013). *Elektronik in der Fahrzeugtechnik; Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement*. Wiesbaden: Springer-Verlag.

Brockhaus - Die Enzyklopädie, 20. Aufl. (1998). Leipzig - Mannheim: F.A. Brockhaus.

Bröbel, A. (3. Mai 2016). *Rawlemon.com*. Von <http://www.rawlemon.com/> abgerufen

Büll, R. (1977). *Das große Buch vom Wachs, Bd. 2*. München: Callwey-Verlag.

Demtröder, W. (2008). *Experimentalphysik 1, 5. Aufl.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Demtröder, W. (2008). *Experimentalphysik 2, 5. Aufl.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Demtröder, W. (2012). *Experimentalphysik 2, 6. Aufl.* Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Diekmann, K., Jany, P., Thoben, L. H., Lück, D. (2005). *Friseurfachkunde*. Wiesbaden: Teubner- Verlag.

Dittmar-Ilgen, H. (2005). *Wie das Salz ins Meerwasser kommt und warum es keine Eisblumen mehr gibt*. Stuttgart: Hirzel-Verlag.

Drösser, C. (11. August 2011). *Zeit online*. Von <http://pdf.zeit.de/2011/33/Stimmts-Klimaanlagen.pdf> abgerufen

Falbe, J., & Regitz, M. (1997). *RÖMPP Lexikon Chemie, 10. Auflage*. Stuttgart: Georg Thieme-Verlag.

- Faraday, M. (1980). *Naturgeschichte einer Kerze*. Hildesheim- Berlin: Franzbecker-Verlag.
- Frey, R. p. (2015). *Streckenfliegen*. Norderstedt: Books on Demand GmbH.
- Fritz, H. A. (2015). *Fertigungstechnik*. Berlin: Springer-Vieweg.
- Fritz, S., Schwalm, E., Kuhn, B., Kanbay, F., Landwehr, K., Huwald, H., Liebers, I. (2009). *Die 1000 interessantesten Kinderfragen*. München: Compact-Verlag.
- Giancoli, C. D. (2010). *Physik, Lehr und Übungsbuch*, 2. Aufl. München: Pearson Studium.
- Grötzebauch, H., Hahn, T., & Nordmeier, V. (2009). *DidCAM - Wärmebildkamera „Low Cost“*. Von <http://tavrodir.lima-city.de/Waermebildkamera.pdf> abgerufen
- Hackstein, R., Below, F., Heeg, F. J. (1986). *Arbeitsorganisation und neue Technologien, Impulse für eine weitere Integration der traditionellen arbeitswissenschaftlichen Entwicklungsbereiche*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.
- Haefer, R. A. (1991). *Oberflächen und Dünnschichttechnologie*. Berlin-Heideberg: Springer-Verlag.
- Hagebölling, D., Halbe, A., Kirchoff, W., Lieber, S., Siepelmeyer-Kierdorf, L. (1999). *Taschenbuch betrieblicher Brandschutz*. Essen: Vulkan.
- Hau, E. (2008). *Windkraftanlagen-Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- Hecht, E. (2009). *Optik*. München: Oldenbourg Verlag.
- Hoppe, E., Lambertz, A., Mecke, R., Scheel, K., Timerding, H. (1926). *Geschichte der Physik, Vorlesungstechnik*. Berlin: Julius Springer.
- Kaufmann, M. (2013). *Plasmaphysik und Fusionsforschung*. Wiesbaden: Springer-Verlag.
- Kilian, U., & Aschemeier, R. (2012). *Das Große Buch vom Licht*. Darmstadt: WBG-Verlag.
- Kluge, F. (1953). *Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache, 16. Aufl.* Berlin: de Gruyter - Verlag.

Knapp Friedrich, L. (1865). *Lehrbuch der chemischen Technologien zum Unterricht und Selbststudium (1. Bd)*, Braunschweig: Friedrich Vieweg und Sohn.

Korthaase, S. (2010). *Magische Experimente für den Physikunterricht*. Donauwörth: Auer-Verlag.

Krätz, O. (1979). *Historische chemische und physikalische Versuche*. Köln: Deubner & Co. KG - Verlag.

Kreißl, R. F., & Otto, K. (1999). *Feuer und Flamme, Schall und Rauch; Schauexperimente und Chemiehistorisches*. Weinheim: WILEY-VCH - Verlag GmbH.

Kressierer, S. (2011). *Technische Universität München*. Von <https://www.av.ph.tum.de/Experiment/1000/Beschreibungen/ver1120.php> abgerufen

Kuchling, H. (2014). *Taschenbuch der Physik, 21. Aufl.* München: Carls Hanser-Verlag.

Landesregierung, A. d. (5. Mai 2016). [www.land-oberoesterreich.gv.at](http://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/u_leitfaden_alu_magn.pdf). Von http://www.land-oberoesterreich.gv.at/files/publikationen/u_leitfaden_alu_magn.pdf abgerufen

Lang, E. (2014). *Physiologie für Heilpraktiker*. Stuttgart: Haug-Verlag.

Lange, G. (18. April 2016). *Uni Rostock*. Von http://www.didaktik.chemie.uni-rostock.de/fileadmin/MathNat_Chemie_Didaktik/Downloads/Feuer.pdf abgerufen

Latsch, H. P., & Klein, H. A. (2007). *Anorganische Chemie, Chemie-Basiswissen I*. Berlin- Heidelberg: Springer-Verlag.

Luerßen, B., Peppler, K., Ries, M., Janek, J., Over, H. (2015). Ein physikalisch Chemisches Wunderwerk... Die Kerze. *Chemie in unserer Zeit*(49), S. 362-370.

Matthäi, M., & Petereit, N. (6. Mai 2016). www.guetezeichen-kerzen.com. Von http://guetezeichen-kerzen.com/fileadmin/user_upload/pdf/Die-Qualitaetskerze2003%20mit%20Abbildungen_.pdf abgerufen

Matz, J., & Mehl, H. (2000). *Vom Kienspan bis zum Laserstrahl, Zur Geschichte der Beleuchtung von der Antike bis heute*. Husum: Husu, Druck- und Verlagsgesellschaft mbH u. co. KG.

Merkel, G. (2008). *Technik der Wasserversorgung, Praxisgrundlagen für Führungskräfte*. Oldenburg: Oldenburg Industrieverlag GmbH.

Meschede, D. (2015). *Gerthsen Physik*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Meurer, B., & Zablocki, A. (18. April 2016). *Uni Münster*. Von http://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/didaktik_der_chemie/ausarbeitungbackpulver.pdf abgerufen

Moschig, F. G. (2014). *Bausanierung, Grundlagen-Planung-Durchführung*, 4.Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Mousset, A. (11. November 2015). *science.lu*. Von <http://www.science.lu/de/content/wie-funktioniert-eine-multispektralbrille> abgerufen

Nowottnick, K. (2012). *Kerzen ziehen und gießen, Gestalten mit Wachs*. Graz: Leopold Stocker-Verlag.

Ottersbach, G. (1919). *Vorschriftenbuch für Drogisten*, 8. Aufl. Berlin-Heidelberg: Springer - Verlag.

Pfeifer, T. (3. Mai 2016). *alufoil.org*. Von http://www.alufoil.org/tl_files/reference_library/vr_fp05_s32-34.pdf abgerufen

Pottlacher, G. (Dezember 2012). *Weihnachtsvorlesung*. TU Graz, Graz, Steiermark, Österreich.

Priese, L. (2015). *Computer Vision: Einführung in die Verarbeitung und Analyse digitaler Bilder*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Raaf, H. (!982). *Chemie des Alltags, Chemie für Jedermann von Alkohol bis Zündholz*. 25. Aufl. Stuttgart: Franck'sche Verlagshandlung.

Repetzki, K. (1973). *3000 Jahre Grubenleuchte - Zur Geschichte der Grubenlampe*. Wien: Montan-Verlag.

Riecke, E. (2015). *Lehrbuch der Experimental-Physik (2. Bd.), Magnetismus, Elektrizität, Wärme*. Paderborn: Salzwasser-Verlag.

Ryder, P. (2004). *Einführung in die Elektrodynamik und die spezielle Relativitätstheorie*. Germany: Shaker-Verlag.

Schivelbusch, W. (1941). *Lichtbliche, Zur Geschichte der künstlichen Helligkeit im 19. Jahrhundert*. München Wien: Carl Hanser-Verlag.

Schlichting, H. J. (2011). Was das Feuer am Leben erhält. *Spektrum*, 41.

Schlichting, H. J. (30. November 2014). *Eine Kerzenkorona zum 1. Advent*. Von <https://hjschlichting.wordpress.com/2014/11/30/eine-kerzenkorona-zum-1-advent/#more-5496> abgerufen

Schlichting, H. J. (20. März 2016). *Physikalische Anmerkungen zur schwimmenden Kerze*. Von Westfälische Wilhelms-Universität Münster: http://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/197_schwimmende_kerze.pdf abgerufen

Scholz, G. (2013). *Heisswasser- und Hochdruckdampfananlagen*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Scholze, H. (1977). *Glas, Natur, Struktur und Eigenschaften* (2. Aufl.). Berlin: Springer-Verlag.

Schramm, H., Schwarte, L., & Lazardzig, J. (2006). *Spektakuläre Experimente, Praktiken der Evidenzproduktion im 17. Jahrhundert*. Berlin: De Gruyter.

Seidl, K. (1996). *Die Kerze, Motivgeschichte und Ikonologie*. Hildesheim Zürich New York: Georg Olms-Verlag.

Siekmann, H. E., & Thamsen, P. U. (2007). *Strömungslehre*. Berlin: Springer-Verlag.

Sommer, S. (20. April 2016). *Netexperimente 2.0*. Von <http://netexperimente.de/chemie/82.html> abgerufen

Spohn, M., & Spohn, R. (2011). *Kosmos, Baumführer Europa*. Stuttgart: Franckh-Kosmos-Verlag.

Steinhoff, R. (2015). *Kondensation und Verdampfung an strukturierten Rohren*. Wiesbaden: Springer-Verlag.

Steinwender, P. (12. Mai 2012). *Physikalische Experimente mit Flaschen; Diplomarbeit*. Graz.

Stiftung, J. H. (2001). *leifiphysik*. Von <http://www.leifiphysik.de/mechanik/kreisbewegung/versuche/rotierende-kerze> abgerufen

Thoma, H. (1921). *Hochleistungskessel*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Tipler, A. P., Mosca, G., Wagner, J. (2015). *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Berlin-Heidelberg: Springer.

Urban, K. (2015). *Materialwissenschaft und Werkstoffkunde*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Von Storch, H., Güss, S., & Heimann, M. (1999). *Das Klimasystem und seine Modellierung*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag.

Welsch, N., & Liebmann, C. C. (2012). *Farben, Natur-Technik-Kunst*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Wiesinger, J. (2015). *KFZ Tech*. Von <http://www.kfztech.de/kfztechnik/sicherheit/airbag/airbag2.htm> abgerufen

Wissenschaft, B.-B. A. (6. Mai 2016). *Digitales Wörterbuch der deutschen Sprachen*. Von DWDS: <http://www.dwds.de/?qu=Kerze> abgerufen

Wörner, M. (2006). *Wärme- und Stofftransport in einer Flugzeugkabine unter besonderer Berücksichtigung des Feuchtetransportes*. Göttingen: Cuvillier-Verlag.

Zobel, D. (2016). *Die Wissenschaft hinter der Big Bang Theory*. München: Riva-Verlag.

Zürcher, C. (13. Juli 2008). *Zürcher Zeitung*. Von <http://www.nzz.ch/der-perfekte-sturm-1.782784> abgerufen

Zürcher, C., & Frank, T. (1998). *Bauphysik, Leitfaden für Planung und Praxis*. Zürich: vdf Hochschulverlag AG.