

Experimente mit Feuer

Diplomarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
eines Magisters der Naturwissenschaften

an der Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Konstantin SMOLINER

Am Institut für Experimentalphysik TU Graz

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

Graz, 18.04.2019

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Diese 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 digitalen Version.

Graz, im April 2019

Unterschrift : _____

Danksagung

Besonderer Dank gilt meinen Eltern und Großeltern, die mich in jeder Lebenslage unterstützen. Ich bin so unbeschreiblich dankbar, dass ich immer die Möglichkeit hatte meinen eigenen Weg zu finden und mir in jeder Situation der Hilfe meiner Familie sicher sein kann. Sowohl diese Arbeit als auch mein gesamtes Studium wäre ohne die Unterstützung meiner Eltern und Großeltern nicht möglich gewesen. Danke, dass ihr immer für mich da seid.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Freunden, die meine Studienzeit unvergesslich gemacht haben. Ohne ihre Freundschaft, Unterstützung und Motivation wäre ich schon oft gescheitert. Danke Alina, Christiana, Claudio, Martin, Stefan, Sven, und Thomas.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei Herrn Ao. Univ. – Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher für die sehr freundliche und hervorragende Betreuung bedanken. Ohne den beträchtlichen Zeitaufwand bei der Betreuung, die zur Verfügung gestellten Geräte und Räumlichkeiten, die guten Ratschläge und die Mithilfe beim Experimentieren, wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit „Experimente mit Feuer“ stellt ein ausführliches Sammelwerk von Experimenten dar, welches im Zuge des Schulunterrichts zur Veranschaulichung vieler physikalischer und chemischer Phänomene herangezogen werden kann. Im ersten Teil wird die Bedeutung des Experiments im Physikunterricht diskutiert und erklärt wie ein Experiment, im Hinblick auf die Fachdidaktik, sinnstiftend in den Unterricht eingebunden werden kann. Im nachfolgenden Theoriekapitel sind alle fachlichen Details und Hintergrundinformationen zu den auftretenden Phänomenen präzise erläutert und für den Leser oder die Leserin ausführlich und dennoch kompakt aufbereitet. Das letzte Kapitel listet alle durchgeführten Experimente samt Materiallisten, Erläuterungen zum Aufbau, Herstellungsanleitungen und kompletten fachlichen Erklärungen. Viele der behandelten Experimente sind klar dem Bereich der Thermodynamik, also der Experimentalphysik, zuzuordnen. Da Feuer jedoch sowohl physikalisch als auch chemisch beschrieben werden muss eignen sich viele der Demonstrationsexperimente vor allem für den naturwissenschaftlichen oder fächerübergreifenden Unterricht.

Abstract

This thesis represents an extensive compilation of experiments, which can be used for the visualisation of many physical and chemical phenomena as a part of school teaching. The first part discusses the significance of experiments in science education and how to incorporate them in a meaningful way regarding subject didactics. In the subsequent theory chapter all the details and background information, specific to the subject and the occurring phenomena, are precisely elucidated and, for the reader, elaborately but compactly resumed. The last chapter lists all the implemented experiments including lists of materials, declarations concerning the setup, production manuals and technical explanations. Many of the discussed experiments are clearly assigned to the science field of thermodynamics and therefore associated with experimental physics. Due to the fact, that fire must be explained as a physical and a chemical concept, a vast number of the provided experiments are suitable both for science education as well as interdisciplinary teaching.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Fachdidaktische Betrachtung.....	2
2.1	Experimente im Schulunterricht	2
2.1.1	Der Lernprozess.....	2
2.1.2	Konzeptwechselstrategien	3
2.1.3	Zielsetzung.....	4
2.1.4	Experimente und Lernwirksamkeit	7
2.2	Bezug zum Lehrplan	8
2.2.1	AHS Unterstufe.....	8
2.2.2	AHS Oberstufe	9
2.2.3	Höhere technische und gewerbliche Lehranstalten	11
3	Theoretische Grundlagen.....	13
3.1	Die Oxidationsreaktion.....	13
3.1.1	Innere Energie und Enthalpie.....	13
3.1.2	Reaktionsenthalpie.....	15
3.1.3	Der Hess'sche Satz	16
3.1.4	Bildungsenthalpie.....	16
3.1.5	Bindungsenthalpie.....	17
3.1.6	Zusammenhang zwischen Bindungsenthalpie und Reaktionsenthalpie.....	18
3.1.7	Sauerstoff	19
3.1.8	Brennstoffe.....	20
3.2	Gasgesetze.....	21
3.2.1	Druck-Volumen-Beziehung, das Boyle'sche Gesetz.....	21
3.2.2	Temperatur-Volumen-Beziehung, das Charles'sche Gesetz.....	21

3.2.3	Menge-Volumen-Beziehung, das Avogadro'sche Gesetz	22
3.2.4	Die ideale Gasgleichung	22
3.3	Thermodynamik von Verbrennungsvorgängen	24
3.3.1	Wärmekapazität	24
3.3.2	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	24
3.3.3	Der Carnot'sche Kreisprozess	25
3.3.4	Reversible und Irreversible Zustandsänderungen	26
3.3.5	Die Entropie.....	27
3.3.6	Grundsätze der statistischen Thermodynamik	29
3.3.7	Dritter Hauptsatz der Thermodynamik	31
3.3.8	Die freie Enthalpie	31
3.4	Wärmetransport.....	33
3.4.1	Wärmeleitung.....	33
3.4.2	Konvektion.....	35
3.4.3	Wärmestrahlung.....	36
3.4.4	Schwarze Körper.....	38
3.5	Das Feuer.....	39
3.5.1	Was ist Feuer?	39
3.5.2	Flammen und Flammentypen	40
3.5.3	Plasma	42
4	Experimente	44
4.1	Acetonoxidation durch Kupfer-Katalyse	44
4.2	Brennende Stahlwolle	46
4.3	Die brennende Hand	47
4.4	Wiederentzünden einer Kerze über ihre Rauchsäule	49
4.5	Die schlechte Wärmeleitung von Stahl	50

4.6	Thermitreaktion	51
4.7	Das Flammensieb (Davy-Lampe).....	53
4.8	Spraydosen-Flammenwerfer.....	54
4.9	Der fliegende Teebeutel.....	55
4.10	Brennendes Handgel	56
4.11	Rekonstruktion von Starlite.....	57
4.12	Die Pharaoschlange	59
4.13	Thermische Expansion eines Metallstabes	61
4.14	Thermische Volumexpansion	63
4.15	Das singende Rohr.....	65
4.16	Fettbrand.....	67
4.17	Schwarzes Feuer.....	69
4.18	Gusseisenstab sprengen.....	71
4.19	Die Kerze im Glas.....	72
4.20	Feuerstahl.....	74
4.21	Herstellung von Holzkohle	75
4.22	Herstellung von Holzgas	77
4.23	Die Kerzenschaukel	79
4.24	Die Mini-Schmiede	80
4.25	Staubexplosion	83
4.26	Kong Ming Laterne	84
4.27	Magnetische Kerzenflamme	85
4.28	Funkenentladung	87
4.29	Erzeugen eines Magnetfelds durch Thermoelektrizität.....	89
4.30	Schwarzer Strahler (Hohlkörperstrahlung)	91
4.31	Streichholz in der Mikrowelle	93

4.32	Der Flaschengeist	95
4.33	Wärmeleitung verschiedener Metalle	96
4.34	Die Wasserlinse	97
4.35	Flammen ersticken	98
4.36	Streichholzrakete	100
4.37	Die Butterkerze	102
4.38	Napalm	103
4.39	Feuermachen mit einem Handbohrer	105
4.40	Magnetische Streichhölzer	107
4.41	Der brennende Geldschein	108
5	Abbildungsverzeichnis.....	109
6	Literatur.....	112

1 Einleitung

Die Fähigkeit mit Feuer umzugehen, ist eine universale menschliche Errungenschaft [...] [(1), S. 17]. Ihr ist es zu verdanken, dass wir Menschen uns über Kulturen und Zeitalter hinweg von der Tierwelt abgrenzen und weiterentwickeln konnten. Die Nutzbarmachung des Feuers spielte eine so tragende Rolle in der „Menschwerdung“, dass es nicht weiter verwunderlich ist, dass Feuer tief verankert in verschiedensten Mythologien und den Anfängen der heutigen Naturwissenschaften zu finden ist. Man denke an Prometheus, der nach griechischer Mythologie den Menschen das Feuer brachte und Ihnen so ein göttliches Geschenk machte. *Nomen est omen*, denn der Name Prometheus bedeutet: „Der Vorausdenkende“. Die Griechen waren sich also der Bedeutung ihres Geschenkes bewusst. Ebenso findet man das Feuer in dem Modell der Platonischen Körper von *Empedokles* (490 – 430 v. Chr.) wieder. Nach seinen Lehren waren alle Dinge aus den vier Elementen aufgebaut, zu denen auch Feuer zählte. vgl. [(2), S. 8]

Feuer übt eine Faszination auf uns aus, doch oft ist es eine Gratwanderung zwischen sinnvollem und verantwortungsvollem Umgang mit dem Feuer und einer Katastrophe. Nicht umsonst verwendet man den Ausdruck: „mit dem Feuer spielen“ bei Unternehmungen oder Handlungen die unter kleinsten Änderungen der Gegebenheiten einen negativen bzw. gefährlichen Verlauf nehmen könnten.

Diese Diplomarbeit wird sich mit Experimenten befassen, deren Durchführung oder Effekt maßgeblich vom Einsatz eines kontrollierten Feuers abhängig ist. Es werden Experimente aus unterschiedlichsten Bereichen der Physik und der Chemie aufgelistet, dokumentiert und zusätzlich, falls sinnvoll, auch per Video demonstriert.

Eine wesentliche Idee dieser Diplomarbeit ist es, ein für den Schulunterricht gut brauchbares Werk zu verfassen, das sowohl praktische Durchführungen und passendes Videomaterial zur Verfügung stellt, als auch die notwendige fachliche Basis schafft, alle auftretenden Prozesse und Phänomene präzise erläutert und in übersichtlicher Weise in einem Theoriekapitel zu Beginn dieser Arbeit zusammenfasst.

2 Fachdidaktische Betrachtung

Ein wichtiges Anliegen des modernen naturwissenschaftlichen Unterrichts muss es sein, den Schülerinnen und Schülern einen interessanten, inspirierenden und hoffentlich unvergesslichen Physikunterricht zu bieten. Darum ist es unerlässlich, auf dem aktuellsten Stand der fachdidaktischen Forschung zu bleiben und Veränderungen und neuen Erkenntnissen, ob fachlicher oder fachdidaktischer Natur, immer offen gegenüber zu stehen. In diesem Kapitel soll daher erläutert werden, warum das Experiment im Unterricht eine große Rolle spielt und welche Problematik in Bezug auf die Lernwirksamkeit damit verbunden ist. Ebenso soll darauf eingegangen werden, wie die Einbindung und die Durchführung der Experimente strukturiert werden können und wie all diese Aspekte mit dem Lehrplan zu vereinbaren sind.

2.1 Experimente im Schulunterricht

2.1.1 Der Lernprozess

Die wesentliche Funktion des Experiments im Physikunterricht besteht darin, das Lernen der Schülerinnen und Schüler zu unterstützen. Doch der Prozess des Lernens erfolgt keineswegs automatisch und kann durch bloßes Bereitstellen von gut aufgearbeitetem Unterrichtsstoff nicht erfolgen. Es ist notwendig, dass sich die Lernenden ihr Wissen im Hinblick auf schon Bekanntes selbst konstruieren. Diese Sicht des Lernens wird aus diesem Grund als „*konstruktivistisch*“ bezeichnet. Da also jede Schülerin und jeder Schüler den Lernprozess auf schon aus der Umgebung und Lebenswelt bekannten Phänomenen aufbaut, werden Lehrerinnen und Lehrer im Unterricht mit unterschiedlichsten Konzepttheorien und Vorstellungen konfrontiert. Eine Aufgabe von Experimenten kann es auch sein, den Lernenden einen Konzeptwechsel zu ermöglichen oder zu erleichtern. Ein Konzeptwechsel kann allerdings nur erfolgen, wenn die daraus resultierenden Erkenntnisse oder Auswirkungen in der „*Lebenswelt*“ der Lernenden plausibel erscheinen oder sich bei Anwendung als vorteilhaft erweisen. Das Erlernte muss sich als im Einklang mit der Realität erweisen. [(3), S. 588] Nicht unwesentlich sind ebenso der Ort, an dem gelernt wird, die verwendeten Medien und die beteiligten Personen. Man spricht von „*sozial-konstruktivistischem Lernen*“.

vgl. [(4), S. 106] [(3), S. 587ff]

Da der Lernprozess so stark abhängig von bereits Bekanntem oder den eigenen subjektiven Sichtweisen ist, kann auch nicht erwartet werden, dass jede Schülerin oder jeder Schüler bei der Durchführung oder Observation eines Experiments die gleichen Schlüsse zieht oder Effekte beobachtet. Die Aufgabe des Lehrers oder der Lehrerin ist nicht die des Wissensübermittlers. Das ist in dieser Form auch auf Grund der Komplexität des Lernprozesses, gar nicht möglich. Schülerinnen und Schüler bringen oft eine gewisse Grundresistenz gegen Veränderung ihrer wohl bewährten Alltagstheorien mit, die nicht einfach ersetzt oder verdrängt werden kann. Der Lernprozess schließt immer „*affektive*“ Aspekte mit ein, denn jede Lernende oder jeder Lernende hat eigene Bedürfnisse und Interessen, nimmt also die Realität möglicherweise anders wahr. Es ist daher sinnvoll, Experimente so zu planen oder auszuwählen, dass möglichst viele Interessensgebiete, zumindest sekundär, abgedeckt werden. Dies, sowie diverse Konzeptwechselstrategien sollten in der Unterrichtsplanung und Zielsetzung berücksichtigt werden. vgl. [(3), S. 589ff]

2.1.2 Konzeptwechselstrategien

Ein Konzeptwechsel wird im Zuge des Lernprozesses vollzogen, wenn die Alltagsvorstellungen durch die jüngst erlernten physikalischen Gesetze oder Erkenntnisse erneuert werden. Alte Vorstellungen bleiben jedoch meist vorhanden, sie werden nur durch neue Facetten erweitert. Ein guter Physikunterricht und damit auch der Einsatz eines Experiments, sollte so gestaltet sein, dass die Schülerinnen und Schüler einen möglichst großen Sinn in der Erweiterung ihrer bisher gesammelten Erfahrungen und Vorstellungen der „*physikalischen Welt*“ sehen. Um als Lehrperson auf einen Konzeptwechsel im Unterricht hin zu arbeiten, gibt es vier wichtige Orientierungshilfen, die bei diversen Untersuchungen als die erfolgreichsten identifiziert werden konnten. vgl. [(3), S. 591f]

1. Die Lernenden müssen mit den bereits vorhandenen Vorstellungen unzufrieden sein.
2. Die neue Vorstellung muss logisch verständlich sein.
3. Sie muss einleuchtend, also intuitiv plausibel sein.
4. Sie muss fruchtbar, d.h. in neuen Situationen erfolgreich sein. vgl. [(3), S. 591]

Um einen Konzeptwechsel bzw. die Erweiterung der Alltagsvorstellungen zu ermöglichen, ist es also notwendig die oben genannten Orientierungshilfen sooft und so gut wie möglich in

alle Planungsschritte mit einfließen zu lassen. Um hier eine auch eine tatsächliche Strategie anzuführen, folgt nun die sogenannte „Anknüpfen-Umdeuten-Konfrontieren“ Methode. vgl. [(3), S. 593]

Anknüpfen: Um einen guten Anknüpfungspunkt zu wählen, wird eine Beobachtung oder Alltagsvorstellung gewählt, die möglichst wenig von den tatsächlichen physikalischen Interpretationen abweicht. Dies soll einen kontinuierlichen Übergang zwischen den beiden Konzepten ermöglichen und eine Art Schritt für Schritt Annäherung ermöglichen. vgl. [(3), S. 593]

Umdeuten: Hier wird vom Anknüpfungspunkt ausgehend und dadurch je nach Vorwissen oder Vorstellung das schon vorhandene Konzept erweitert und mit Hilfe von fachlich korrektem Vokabular umgedeutet. Es geht darum, die bereits physikalisch richtigen Ansätze zu verfeinern, umzudeuten und zu erweitern. vgl. [(3), S. 593]

Konfrontieren: Dieser Ansatz setzt - konträr zu den anderen beiden vorher genannten Ansätzen auf eine direkte Konfrontation der Schülerinnen und Schüler mit Ihren unvollständigen oder falschen Annahmen. Dazu bedarf es aber des konkreten Wissens über die Art und Ausprägtheit einer Fehlvorstellung und einer guten Möglichkeit, diese aufzudecken, also den Lernenden bewusst zu machen. Dafür eignen sich natürlich Experimente ausgezeichnet mit der Prämisse, dass deren Erkenntnisse eindeutig deutbar und erkenntlich sind. Ein „*kognitiver Konflikt*“ kann nur hervorgerufen werden, wenn auch ein Anreiz dazu besteht. vgl. [(3), S. 593f]

2.1.3 Zielsetzung

Der Begriff der Zielsetzung ist ein ganz elementarer Begriff der Fachdidaktik. Elementar deswegen, weil viel von einer strukturierten, geplanten und analysierten Zielsetzung abhängt. Bezüglich der Zielsetzung wird allerdings in der vorliegenden Arbeit lediglich der Einsatz des Experiments behandelt, um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen. Weiterführende

Informationen zur allgemeinen Zielsetzung und Planung von Zielen kann den fachdidaktischen Quellen entnommen werden. vgl. [(3), S. 97f]

Um die Sinnhaftigkeit des Einsatzes eines Experiments im Schulunterricht zu gewährleisten, ist es notwendig, ein klares Ziel zu verfolgen. Die gewünschte Reaktion der Schülerinnen und Schüler kann in Grundzügen geplant werden und kann so in die Strukturierung des Unterrichts einfließen. Die Art der Anwendung und Durchführung von Experimenten kann je nach Zielsetzung variieren. So kann man etwa Demonstrationsexperimente als Knalleffekt oder guten Stundeneinstieg verwenden, ohne sofort jedes damit verbundene Phänomen zu erläutern. Es soll hierbei nur darum gehen Interesse zu wecken und Faszination für das später Folgende zu fördern.

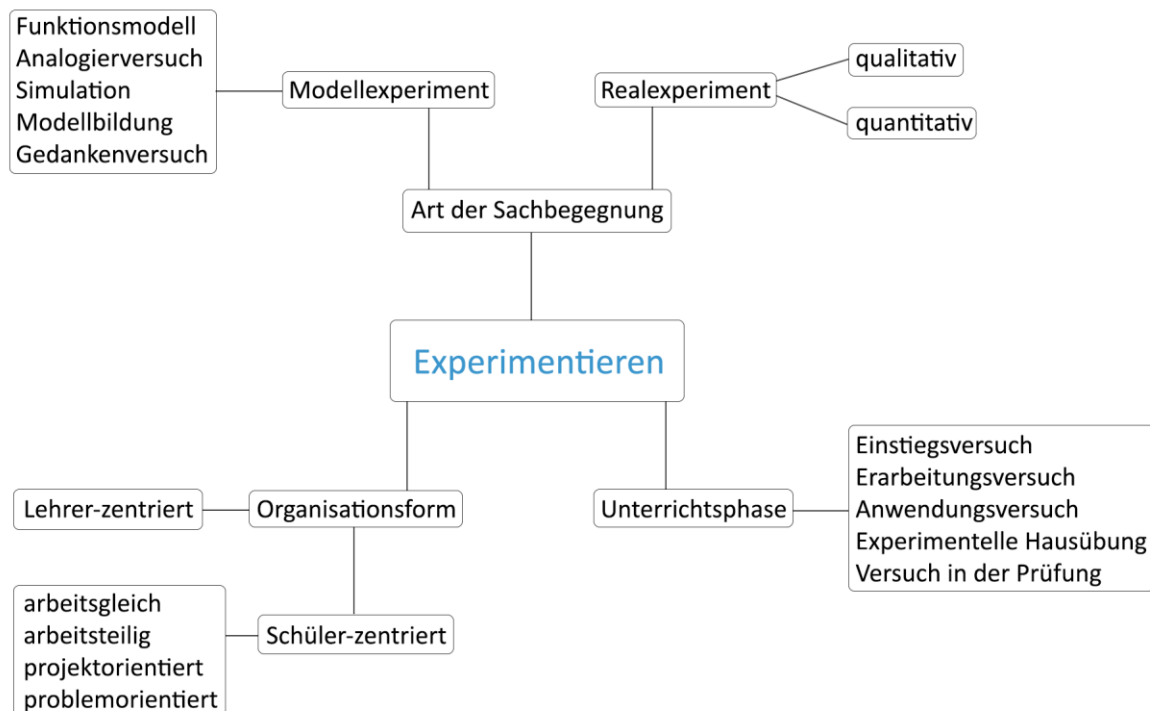


Abbildung 1: Experimentieren im Physikunterricht (Mindmap); eigene Grafik; vgl. Abb. 14.2 [3] Seite 109

Ein klarer Unterschied also zum klassischen wissenschaftlichen Experiment. Die Charakterisierung und damit das Ziel, das mit der Durchführung verfolgt wird, hängt also von verschiedensten Faktoren ab, die in der Abbildung 1 skizziert sind. vgl. [(4), S. 108f]

Zur Begriffserläuterung:

Realexperiment: Lässt sich das Phänomen oder der Sachverhalt direkt mit Hilfe eines Experiments veranschaulichen, so spricht man von Realexperimenten. Diese wiederum lassen sich kategorisch durch ihre Komplexität oder den damit verbundenen Aufwand erneut unterteilen in qualitative Experimente, quantitative Experimente und Freihandexperimente. Direkte Messungen von physikalischen Größen wie Druck oder Stromstärke würden unter den Begriff der Realexperimente fallen. vgl. [(4), S. 108]

Modellexperiment: Experimente die weder real noch direkt veranschaulicht oder durchgeführt werden können, müssen in übertragener Weise erläutert oder visualisiert werden. Hier bietet es sich an, Realexperimente in anderen Maßstäben als analoge Ersatzversuche zu demonstrieren. So können etwa Molekülbewegungen in idealen Gasen über Kunststoffkugeln abgebildet werden. Ebenso fallen Simulationen und Computerapplikationen unter diese Kategorie. Modellexperimente durchzuführen ermöglicht es im Unterricht, die Wichtigkeit des Modells in der Physik zu lehren, deswegen sind Realexperimente nicht unbedingt Modellversuchen vorzuziehen, vorausgesetzt, die Funktionsweise von Modellen und deren Aufgabe können verständlich kommuniziert werden. vgl. [(4), S. 108f]

Organisationsform: Die Organisationsform klärt, ob der Großteil der Durchführung oder Auswertung von Experimenten bei der Lehrkraft oder den Schülerinnen und Schülern liegt. Wenn etwa mehr Fachkenntnis, Geschick, Übung oder die Aussetzung einer Gefahr mit der Durchführung verbunden ist, wird die Lehrkraft übernehmen. Dabei ist darauf zu achten, dass der Aufbau gut von allen Schülerinnen und Schülern gesehen werden kann. Es bietet sich an, Hilfsmaterial wie zum Beispiel Webcams zu verwenden, um die Sichtbarkeit zu erhöhen und eventuell Material zu speichern oder zu editieren. Dennoch ist es wichtig, auch Schülerexperimente durchzuführen, da auf diese Art wichtige Handlungskompetenzen des naturwissenschaftlichen Arbeitens vermittelt werden können. vgl. [(4), S. 109f]

Unterrichtsphasen: Die Klassifizierung nach Unterrichtsphasen kategorisiert Experimente nach der Art wie sie in das Unterrichtsgeschehen eingebunden werden und welche Ziele damit verfolgt werden. So gibt es beispielsweise Experimente, die sich ausgezeichnet für den Stundeneinstieg eignen, weil sie mit einem gewissen Überraschungseffekt verbunden sind. Ebenso sind manche Experimente eher in einer Erarbeitungsphase sinnvoll, in der sich Schülerinnen und Schüler genauer mit den ablaufenden Prozessen oder möglichen Messungen befassen können. Demonstrationsexperimente können hilfreich sein, wenn

Phänomene oder Sachverhalte nicht intuitiv klar sind oder die Lernenden stark unterschiedliche Vorstellungen haben. Das Wissen über die unterschiedlichen Vorstellungen kann auch bei der Auswahl eines Demonstrationsexperimentes helfen, da so möglicherweise ein Konzeptwechsel effektiver unterstützt werden kann. vgl. [(4), S. 110]

2.1.4 Experimente und Lernwirksamkeit

Nach all den vorangegangenen Kapiteln mag es jetzt erstaunlich klingen, aber ein Zusammenhang von Lernerfolg und der Durchführung von Demonstrationsexperimenten konnte bisher nicht festgestellt werden. Unter den Aspekten von Kapitel 2.1.1, die erläutern, dass das Vorwissen und die eigenen Sichtweisen Einfluss auf das Beobachtete nehmen, kann jedoch eine plausible Erklärung dafür gefunden werden. Jede Schülerin und jeder Schüler kann unter Umständen unterschiedliche Beobachtungen machen. Demensprechend ist es äußerst wichtig, gut strukturierte Vorbereitungsphasen und Nachbereitungsphasen bereits in der mit dem Experiment verbundenen Unterrichtsplanung zu berücksichtigen. Die erwarteten Phänomene oder Messwerte sollen bereits im Voraus besprochen werden um sicher zu gehen, dass mögliche Fehlinterpretationen unwahrscheinlich sind. Ausschließen oder Eliminieren kann man diese sehr subjektiven Fehlinterpretationen jedoch nie. Entgegenwirken kann man ihnen aber, indem nicht die Durchführung an sich, sondern die *Hinführung* im Fokus des Unterrichts stehen sollte.

vgl. [(4), S. 111f]

Der Effekt bei Schülerversuchen zeigt in erstaunlicher Weise wie wenig der Einsatz von Schüler(innen)-zentrierten Experimenten bewirkt, wenn deren Einsatz im Unterricht unreflektiert und unkritisch erfolgt. Bloßes repetitives Experimentieren steht in keinem Zusammenhang mit wachsendem Lernerfolg. Die Ursache liegt bisweilen darin, dass Schülerexperimente oft so gestaltet sind, dass diese ohne Anwendung von geringstem Fachwissen abgearbeitet und nur mit Hilfe des exakten Befolgens eines „Kochbuchrezeptes“ erfolgreich durchgeführt werden können. Soll die Lernwirksamkeit erhöht werden, so müssen Experimente gezielt in den Lernprozess integriert werden.

vgl. [(4), S. 112f]

2.2 Bezug zum Lehrplan

Im Folgenden wird die gesetzliche Verankerung des Experiments im Schulunterricht in den Lehrplänen der AHS Unterstufe, AHS Oberstufe und Höheren technischen Lehranstalten erläutert. Ebenso wird die Einbindung von fächerübergreifendem Unterricht und die Bedeutung der Physik im naturwissenschaftlichen Unterricht beschrieben. Die hohe Zahl an Experimenten, die im Sinne des Schulunterrichts eher dem Chemieunterricht zugeschrieben werden, soll ebenfalls auf Grund der aktuellen Gesetzeslage begründet werden.

2.2.1 AHS Unterstufe

Der Lehrplan der AHS Unterstufe entspricht dem der NMS, Realgymnasien und Hauptschulen. vgl. [(5)]

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

Dies geschieht durch:

- bewusstes Beobachten physikalischer Vorgänge;
- Verstehen und altersgemäßes Anwenden von typischen Denk- und Arbeitsweisen der Physik;
- Erkennen von Gültigkeitsgrenzen physikalischer Gesetzmäßigkeiten in alltagsbezogenen Situationen;
- eigenständige und handlungsorientierte Auseinandersetzung mit Problemen aus dem Erfahrungsbereich der Schülerinnen und Schüler nach Möglichkeit ausgehend von Schülerexperimenten;
- Entwickeln von Erklärungsversuchen beziehungsweise Modellvorstellungen und deren Anwendungen bei physikalischen Vorgängen in Natur und Technik.

[(6), S. 1]

Schon in den Grundforderungen an den Physikunterricht in der Unterstufe ist das Experimentieren ein zentrales Element. Schülerinnen und Schüler sollen an den Modellbegriff herangeführt werden, wie bereits in 2.1.4 erläutert.

Zusätzlich wird dem Experiment auch in den Bildungsbereichen Kreativität und Gestaltung sowie Sprache und Kommunikation ein hoher Stellenwert eingeräumt.

Kreativität und Gestaltung: Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten; Einfluss der Physik auf Ästhetik, Funktion und Design. [(6), S. 2]

Sprache und Kommunikation: Anwendung einer altersadäquaten Fachsprache; präziser Sprachgebrauch bei Beobachtung, Beschreibung und Protokollierung physikalischer Vorgänge und Planung von Schülerexperimenten. [(6), S. 2]

Die im Lehrplan festgelegten didaktischen Grundsätze, die zu großen Teilen bereits in vorherigen Kapiteln in gekürzter Fassung aufgeführt sind, festigen den hohen Stellenwert des Experiments selbst, aber auch aller damit verbundenen Prozesse. So steht Folgendes dort geschrieben:

Bei der Gewinnung von Gesetzen ist neben der Verallgemeinerung von Beobachtungen auf Grund von Experimenten gelegentlich auch die gedankliche Herleitung und anschließende experimentelle Überprüfung von Lösungsansätzen (Hypothesen) anzuwenden. [(6), S. 2]

An geeigneten Inhalten ist den Schülerinnen und Schülern Gelegenheit zu möglichst selbstständigem Untersuchen, Entdecken bzw. Forschen zu geben. Dies bedingt den Einsatz von Schülerversuchen. Altersgemäße Denkwege und Deutungsversuche der Schülerinnen und Schüler sind zu berücksichtigen. [(6), S. 2]

Das Experiment ist also schon zu Beginn der naturwissenschaftlichen Bildung ein fixer Bestandteil des Physikunterrichts und wird auch vom Gesetzgeber als wichtiger Aspekt im Lehrplan festgehalten. Trotzdem sollten sich Lehrkräfte der damit verbundenen Irrtümer hinsichtlich der Lernwirksamkeit, bewusst sein und Experimente sinnvoll, gut fundiert und praxisnah in den Unterricht einbinden.

2.2.2 AHS Oberstufe

Im Sinne des Lehrplans der AHS Oberstufe ist der Unterricht in Kern- und Erweiterungsbereich zu gliedern, wobei dem Kernbereich zwei Drittel der Stunden zur Verfügung gestellt werden und dieser weiter inhaltlich genau definiert ist. Der Erweiterungsbereich kann genutzt werden, um besondere Gegebenheiten, Interessen, Begabungen, Lernziele, Lernfortschritte,

fächerübergreifende Projekte, materielle Ressourcen oder schulautonome Schwerpunkte in den Unterricht einfließen zu lassen. Kern- und Erweiterungsbereich sind nicht separat zu betrachten, sondern bilden gemeinsam und im ständigen Wechsel den Unterricht.

vgl. [(7), S.17f]

In den didaktischen Grundsätzen des Physikunterrichts in der AHS Oberstufe wird dem Experimentieren eine eigene Kategorie gewidmet.

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

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

[(7), S. 183]

Beiträge zu den Bildungsbereichen:

Sprache und Kommunikation: [...] physikalische Sachverhalte beschreiben, protokollieren, argumentieren und präsentieren können; [...]

[(7), S. 182]

Natur und Technik: [...]Naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen erwerben; [...]

[(7), S. 182]

Kreativität und Gestaltung: Naturwissenschaftliche Forschung als kreativen Prozess verstehen; Gestaltung physikalischer und technischer Anwendungen; Kreativität bei Problemlösungsprozessen und Modellbildung.

[(7), S. 182]

2.2.3 Höhere technische und gewerbliche Lehranstalten

Der Physikunterricht in diesen Bildungseinrichtungen wird zusammen mit anderen Naturwissenschaften wie Biologie und Chemie im Naturwissenschaftsunterricht zusammengefasst. Demnach ist eine klare Trennung der Physik von anderen Naturwissenschaften weder nötig noch gewollt. Diese Diplomarbeit befasst sich mit Experimenten, in denen meist sowohl chemische als auch physikalische Phänomene oder Prozesse ablaufen. Ein Großteil der hier beschriebenen Experimente findet also sicher in Schulen dieser Lernform die beste Anwendung.

Der Unterricht wird in Kompetenzbereiche gegliedert. Im Folgenden werden die, für diese Diplomarbeit relevanten, Kompetenzbereiche samt ihrer zentralen Forderungen aufgelistet.

vgl. [(8), S. 25]

Kompetenzbereich „*Grundlegende physikalische Größen und ihre Messung*“:

Die Schülerinnen und Schüler können

- [...]
- Vorgänge und Erscheinungsformen in Natur und Technik beobachten, die zu deren Beschreibung notwendigen physikalischen Größen erkennen, ihre Werte durch Vergleichen, Abschätzen oder Messen ermitteln, Ergebnisse auf Plausibilität prüfen und eine Aussage über deren Genauigkeit machen;
- Vorgänge und Erscheinungsformen in Natur und Technik unter Verwendung von Fachausdrücken beschreiben und ihre Vorgangsweise und die Ergebnisse fachgerecht festhalten. [(8), S. 25]

Kompetenzbereich „*Grundlagen der Chemie*“:

Die Schülerinnen und Schüler

- [...]
- führen Experimente unter sicherheitsrelevanten Aspekten durch und dokumentieren und interpretieren diese mit geeigneten Methoden;
- stellen den Bezug zwischen fachspezifisch erworbenen Erkenntnissen und ihren Alltagserfahrungen her. [(8), S. 25]

Kompetenzbereich „Chemische Technologie“:

Die Schülerinnen und Schüler

- kennen wichtige Rohstoffe und Produkte und verstehen die Bedeutung dieser Stoffe für Wirtschaft, Technik, Gesellschaft und Umwelt;
- führen einfache Experimente zu technologischen Verfahren zur Herstellung von Produkten durch und können die Eigenschaften, Herstellungsverfahren und Einsatzgebiete der Produkte beschreiben;
- [...] [(8), S. 26]

Kompetenzbereich „Physikalische Phänomene und Methoden“:

Die Schülerinnen und Schüler können

- physikalische Experimente planen, durchführen und protokollieren;
- Zusammenhänge zwischen Messgrößen in Form von Tabellen, Diagrammen und Gleichungen darstellen;
- Hypothesen aufstellen und Modelle entwickeln und diese auf Plausibilität und Gültigkeit prüfen;
- naturwissenschaftliche Fragestellungen analysieren, Untersuchungsstrategien entwickeln und Lösungsansätze formulieren, mögliche Ergebnisse abschätzen und errechnen. [(8), S. 27]

Kompetenzbereich „Naturwissenschaften, Umwelt und Gesellschaft“:

Die Schülerinnen und Schüler

- [...]
- können die Gewinnung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse, deren Verlässlichkeit und Grenzen anhand von Beispielen erläutern;
- können zu aktuellen Themen aus unterschiedlichen Medien problemspezifische Informationen beschaffen, ihre sachliche Richtigkeit hinterfragen und in geeigneter Form darstellen;
- können die Konsequenzen von naturwissenschaftlichen Ergebnissen in Bezug auf Nachhaltigkeit und persönliche sowie gesellschaftliche Verantwortung abschätzen, Schlussfolgerungen für ihr Handeln daraus ziehen und dies auch darstellen und begründen. [(8), S. 27]

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Die Oxidationsreaktion

Um zu erklären, was Feuer ist, bzw. wie es entsteht, ist es notwendig, die Oxidationsreaktion zu erläutern. Die Oxidationsreaktion ist eine exotherme Reaktion, also eine chemische Reaktion bei der Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Demnach haben die Reaktionsprodukte bei einer exothermen Reaktion eine geringere Enthalpie bzw. Wärmeinhalt als die Edukte.

3.1.1 Innere Energie und Enthalpie

In der Thermodynamik beschreibt die Enthalpie den Wärmefluss bei Prozessen, die unter konstantem Druck ablaufen und in denen ausschließlich Druck-Volumen-Arbeit geleistet wird.

vgl. [(9), S. 174]

$$H = U + pV \quad (3.1.A)$$

H ... Enthalpie [H] = J U ... innere Energie [U] = J p ... Druck [p] = Pa V ... Volumen [V] = m³

Oxidationsreaktionen, wie sie in dieser Arbeit behandelt werden, finden stets unter Normaldruck von 1,01325 kPa (1 atm) statt. Es kann also mit einer Enthalpieänderung

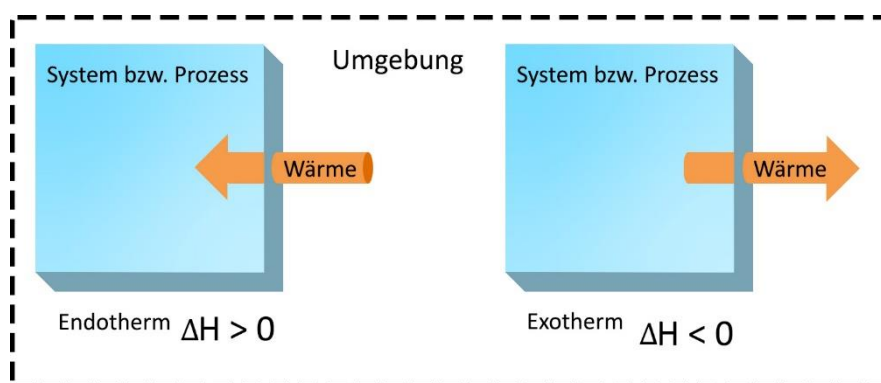


Abbildung 2: Endotherme und Exotherme Prozesse; eigene Grafik

gerechnet werden. Diese erhält man über die Summe der Inneren Energie und dem Produkt aus konstantem Druck und der Volumsänderung.

$$\Delta H = \Delta(U + pV) = \Delta U + p\Delta V \quad (3.1.B)$$

ΔH ... Enthalpieänderung [ΔH] = J U ... innere Energie [U] = J p ... Druck [p] = Pa

ΔU ... Änderung der inneren Energie [ΔU] = J ΔV ... Änderung des Volumens [ΔV] = m³

Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ist die Innere Energie ΔU eines Systems die Summe aus zu- bzw. abgeführter Wärme Q und der Arbeit W , die das System verrichtet oder die am System verrichtet wird. vgl. [(9), S. 174f]

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (3.1.C)$$

ΔU ... Änderung der inneren Energie [ΔU] = J ΔQ ... zu – bzw. abgeführte Wärmemenge [ΔQ] = J

ΔW ... geleistete bzw. am System verrichtete Arbeit [ΔW] = J

Wird einem System also Wärme zugeführt oder Arbeit am System verrichtet, nimmt die innere Energie zu. U bezeichnet man als Zustandsgröße, weil ihr Wert nur vom aktuellen Zustand des Systems abhängig ist, nicht aber von dem Prozess bzw. dem Weg, auf dem dieser erreicht wurde. Die zugeführte Wärmemenge erhöht die Innere Energie ΔU und kann so auch die Temperatur des Systems erhöhen. Wird dabei vom System unter Änderung des Volumens V , die Arbeit ΔW verrichtet, so entspricht diese Arbeit dem Produkt aus der Kraft F auf eine gedachte Fläche A und der Wegänderung Δh dieser Fläche. vgl. [(9), S. 171f] [(10), S.311]

$$\Delta W = F \cdot \Delta h = -p \cdot A \cdot \Delta h \quad (3.1.D)$$

ΔW ... vom System verrichtete Arbeit [ΔW] = J F ... Kraft [F] = N Δh ... Wegänderung [Δh] = m

p ... Druck [p] = Pa A ... Fläche [A] = m²

Betrachtet man die Formel (3.C) unter zu Hilfenahme von (3.D) so erkennt man, dass falls ein Prozess ohne Volumsänderung ΔV stattfindet, die Änderung der inneren Energie ΔU genau der übertragenen Wärme Q entspricht.

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W = \Delta Q - p \cdot \Delta V \quad (3.1.E)$$

ΔU ... Änderung der inneren Energie [ΔU] = J ΔQ ... zu – bzw. abgeführte Wärmemenge [ΔQ] = J

ΔW ... geleistete bzw. am System verrichtete Arbeit [ΔW] = J p ... Druck [p] = Pa

ΔV ... Volumsänderung [ΔV] = m³

Einen solchen Prozess nennt man *isobar*. Bei isobaren Prozessen ist die Enthalpiezunahme ΔH gleich der zugeführten Wärmemenge ΔQ . vgl. [(10), S. 312]

mark1

3.1.2 Reaktionsenthalpie

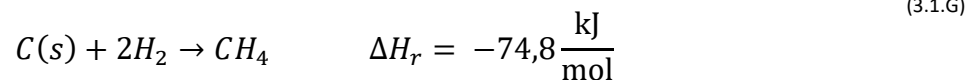
Die Reaktionsenthalpie beschreibt die Enthalpieänderung ΔH_r , die durch eine chemische Reaktion bei konstantem Druck hervorgerufen wird. Der Index r deutet nur an, dass sich die Notation auf eine Reaktion bezieht. vgl. [(9), S. 177]

$$\Delta H_r = H_{\text{Produkte}} - H_{\text{Edukte}} \quad (3.1.F)$$

ΔH_r ... Reaktionsenthalpie [ΔH_r] = J H_{Produkte} ... Enthalpie der Produkte [H_{Produkte}] = J

H_{Edukte} ... Enthalpie der Edukte [H_{Edukte}] = J

Ist die Änderung der Enthalpie negativ ($-\Delta H_r$) so wird Wärme an die Umgebung abgegeben und die Reaktion wird *exotherm* genannt. Reaktionsgleichungen die vollständig ausgeglichen wurden und bei denen die Enthalpieänderung in der eben erwähnten Art dargestellt wird bezeichnet man als *thermochemische Gleichungen*. Ein einfaches Beispiel soll diesen Sachverhalt illustrieren. Betrachten wir die Reaktion von Anthrazitkohle mit Wasserstoff.

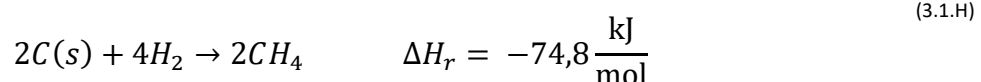


$C(s)$... Kohlenstoff in fester Phase H_2 ... Diwasserstoff CH_4 ... Methan

ΔH_r ... Reaktionsenthalpie [ΔH_r] = $\frac{J}{\text{mol}}$ (hier bezogen auf 1 mol der Reaktanten)

Die Reaktionsenthalpie ΔH_r ist negativ, die Reaktion ist also exotherm und es wird daher Wärme an die Umgebung abgegeben. vgl. [(9); S. 177] [(11)]

Die Enthalpie ist eine *extensive* Eigenschaft. Das heißt, die Enthalpieänderung bzw. die Reaktionsenthalpie ist damit direkt abhängig von den im Prozess oder der Reaktion verbrauchten Edukten. Unter diesen Gegebenheiten wird (3.1.G) erneut betrachtet.



Resultierende Reaktionsenthalpie $\Delta H_r = -149,6 \text{ kJ}$

$C(s)$... Kohlenstoff in fester Phase H_2 ... Diwasserstoff CH_4 ... Methan

ΔH_r ... Reaktionsenthalpie $[\Delta H_r] = \frac{J}{mol}$ (hier bezogen auf 1 mol der Reaktanten)

Die Menge an Energie pro Mol bleibt natürlich gleich, der Betrag an abgegebener Wärmemenge verdoppelt sich aber, da hier die Molzahl der Edukte ebenfalls verdoppelt wurde.

3.1.3 Der Hess'sche Satz

Der Hess'sche Satz besagt, dass bei einer Reaktion, die in mehreren Schritten abläuft, die gesamte Enthalpieänderung ΔH genau der Summe der Enthalpieänderungen der einzelnen Schritte ist. Eine weitere Formulierung hierfür könnte lauten, dass der erste Hauptsatz der Thermodynamik auch für chemische Reaktionen gelten muss. Dies ist nützlich, da es eine Berechnung von Enthalpieänderungen ermöglicht die experimentell schwer erfassbar wären - so zum Beispiel bei vielen Oxidationsreaktionen. Der Hess'sche Satz ist eine Folgerung aus den Eigenschaften von Zustandsgrößen. Die Enthalpie ist, wie schon erläutert, eine Zustandsgröße und ermöglicht dadurch obigen Schluss. vgl. [(9), S. 186] [(12), S. 100]

3.1.4 Bildungsenthalpie

Ein essentieller thermochemischer Prozess ist die Bildung von Verbindungen aus Elementen. Die damit zusammenhängende Enthalpieänderung wird *Bildungsenthalpie* genannt und durch die Notation ΔH_f beschrieben. Da die Bildungsenthalpie von diversen Bedingungen, wie zum Beispiel Druck Temperatur und Aggregatzustand abhängt, ist es erforderlich, die Bindungsenthalpien unter festgelegten *Standardbedingungen* zu vergleichen. Die Temperatur wird auf 298 K und der Druck auf 1 atm festgelegt. Die *Standardenthalpieänderung* bezieht sich also auf die Enthalpieänderung, die auftritt, wenn sowohl Produkte als auch Edukte unter Standardbedingungen vorliegen und miteinander reagieren. vgl. [(9), S. 190]

Die Standardbildungsenthalpie (ΔH_f°) bezieht sich also auf die Enthalpieänderung bei einer Reaktion, bei der ein Mol einer Verbindung aus deren Elementen gebildet wird und alle Substanzen (Produkte und Edukte) unter Standardbedingungen vorliegen. vgl. [(9), S. 191]

Standardbildungsenthalpien (ΔH_f°) sind bereits in den meisten Fällen experimentell bestimmt und in diversen Tabellen zu finden. Mit dem Hess'schen Satz und den gegebenen Werten der Standardbildungsenthalpien können beliebig komplizierte Reaktionsprozesse rekonstruiert und die Standardreaktionsenthalpie (ΔH_r°) mit einfachsten Mitteln berechnet werden. Diese ergibt sich wie folgt:

$$\Delta H_r^\circ = \sum n \cdot \Delta H_f^\circ(\text{Produkte}) - \sum m \cdot \Delta H_f^\circ(\text{Edukte}) \cdot \quad (3.1.1)$$

ΔH_r° ... Standardreaktionsenthalpie [ΔH_r°] = $\frac{J}{mol}$ (hier bezogen auf 1 mol der Reaktanten)

ΔH_f° ... Standardbildungsenthalpie [ΔH_f°] = $\frac{J}{mol}$ (hier bezogen auf 1 mol der Reaktanten)

n, m ... stöchiometrische Koeffizienten

Die Variablen n und m beschreiben hier die stöchiometrischen Koeffizienten der Reaktion. Das bedeutet, dass die Enthalpie einer beliebigen molekularen Verbindung gleich der Standardreaktionsenthalpie ist, die bei der Bildungsreaktion dieser Verbindungen aus ihren chemischen Elementen auftritt [(13), S. 117]. vgl. [(9), S. 192f]

3.1.5 Bindungsenthalpie

Die Stärke einer kovalenten Bindung gasförmiger Moleküle wird durch die Bindungsenthalpie bestimmt. Die Bindungsenthalpie, angegeben in $\frac{kJ}{mol}$, gibt an, wieviel Energie notwendig ist, um eine Bindung dieser Art zwischen zwei Atomen eines Moleküls zu trennen. Sie ist von Bedeutung, weil sie wesentlichen Einfluss auf den Ablauf jeder Oxidationsreaktion hat. vgl. [(11)]

Die Bindungsenthalpie entspricht weder der *Bindungsenergie* eines Elektrons noch der *Bildungsenthalpie*. Ein niedriger Wert der Bindungsenthalpie bedeutet also, dass die kovalente Bindung zwischen zwei Elementen schwach ist und unter geringem Energieaufwand getrennt werden kann. Der Prozess, der jede kovalente Bindung in einem Molekül löst, wird *Atomisierung* genannt und wird benötigt, um durchschnittliche Bindungsenthalpien zu ermitteln. Man spricht in diesem Fall davon, dass ein Molekül in alle Elemente *dissoziiert* wird, aus denen es besteht. Sind Moleküle stark gebunden, die Bindungsenthalpie ist also groß, so ist eine chemische Änderung des Moleküls verhältnismäßig schwerer herbei zu führen als bei

Molekülen mit niedriger Bindungsenthalpie. Das Lösen von chemischen Verbindungen ist immer ein Prozess, der Energie erfordert. Im Umkehrschluss wird bei der Bindung von gasförmigen Molekülfragmenten immer Energie frei. vgl. [(9), S. 320ff]

3.1.6 Zusammenhang zwischen Bindungsenthalpie und Reaktionsenthalpie

Durchschnittliche Bindungsenthalpien sind nützlich, um Reaktionsenthalpien (ΔH_r) abzuschätzen, insbesondere dann, wenn es sich um Gasphasenreaktionen handelt (Die Bindungsenthalpie bezieht sich stets auf die Gasphase). So kann unter anderem schnell ermittelt werden, ob es sich um exotherme oder endotherme Reaktionen handelt, auch wenn die Standardbildungsenthalpien (ΔH_f°) nicht für alle beteiligten Verbindungen bekannt sind.

Durchschnittliche Bindungsenthalpien (kJ/mol)			
Einfachbindungen		Mehrfachbindungen	
C - O	358	C = C	614
O - H	463	C = O	799
O - O	146	O = O	495
C - C	348		

Abbildung 3 : Tabelle Bindungsenthalpien ; vgl. [(9), Tabelle 8.4, S. 320]

Für die Durchführung teilt man die Reaktion in zwei Teilschritte, was nach dem Hess'schen Satz möglich ist, auf. Im ersten Schritt wird die Energie aufgewendet, die nötig ist, um die Bindungen der Edukte zu trennen, die nicht im Produkt vorkommen. Diese Energie ist, wie bereits in 3.1.5 erklärt, die Bindungsenthalpie. Und zwar die Summe der Bindungsenthalpien aller Elemente, die aufgetrennt wurden. Die Gesamtenthalpie des Systems nimmt also um diesen Betrag zu. Im zweiten Schritt werden die Bindungen der Produkte gebildet, die nicht in den Edukten vorhanden waren. Wie bereits in 3.1.2 geklärt wird beim Bilden von Verbindungen Energie frei. Die Gesamtenthalpie des Systems nimmt also wieder um den Betrag der Summe der Produktbindungen ab. vgl. [(9), S. 321]

$$\sum \Delta H_r = \sum \text{Bindungsenthalpien der aufgebrochenen Bindungen} - \sum \text{Bindungsenthalpien der gebildeten Bindungen} \quad (3.1.J)$$

$$\Delta H_r \dots \text{Reaktionsenthalpie } [\Delta H_r] = \frac{J}{\text{mol}} \text{ (hier bezogen auf 1 mol der Reaktanten)}$$

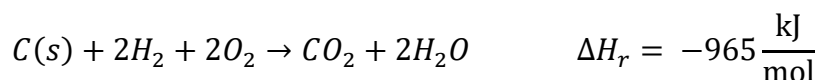
Diese Methode liefert ausschließlich eine brauchbare Schätzung des tatsächlichen Betrags der Reaktionsenthalpie. vgl. [(9), S. 321]

3.1.7 Sauerstoff

Der wohl wichtigste Bestandteil jeder Oxidationsreaktion im klassischen Sinn und deswegen auch ihr Namensgeber, ist der Sauerstoff. Mit dem Begriff Sauerstoff ist meist eigentlich Disauerstoff (O_2), eines der 2 Allotropen von Sauerstoff, gemeint. Sauerstoff ist bei Zimmertemperatur farb- und geruchlos und liegt gasförmig vor. Die Elektronenkonfiguration des Sauerstoff-Atoms ($[He]2s^22p^4$) ermöglicht es durch Aufnahme von zwei Elektronen, oder der gemeinsamen Nutzung zweier Elektronen, der Oktett Regel zu genügen. Sauerstoff formt in kovalenten Bindungen entweder zwei Einzelbindungen oder eine Doppelbindung. Sauerstoff ist das bis heute am meisten genutzte Oxidationsmittel. Warum das so ist wird im nächsten Absatz erläutert. vgl. [(9), S. 881f]

Die Standardbindungsenthalpie von Sauerstoff beträgt: $-498 \frac{kJ}{mol}$. Elementarer Sauerstoff geht also eine relativ starke Bindung ein. Daraus resultiert, dass Sauerstoffverbindungen, die vom elementaren Sauerstoff abweichen, auch stark gebunden sind. Diese sind sogar meist thermodynamisch stabiler als Sauerstoff. Beispielsweise: H_2O mit $-927 \frac{kJ}{mol}$ oder CO_2 mit $2x [-804] \frac{kJ}{mol}$. Zwischen den Bindungsenthalpien der Doppelbindungen von O_2 und den Bindungsenthalpien der C-O-Verbindungen in CO_2 gibt es also einen betragsmäßigen Unterschied von $-306 \frac{kJ}{mol}$. Die Doppelbindung von Sauerstoff ist also ungewöhnlich schwach im Vergleich zu anderen Doppelbindungen oder Paaren von Einzelbindungen. Das hat zur Folge, dass die Bildung stärkerer Bindungen in anderen Molekülen wie CO_2 und H_2O erfolgt und die potentielle Energie dieser Moleküle senkt. Dadurch nimmt die thermische Bewegung der Gasteilchen zu und es kann zur Flammenausbreitung kommen, wenn günstige Verhältnisse für Wärme- und Massentransport gegeben sind. vgl. [(9), S. 881] [(11)]

Um ein Beispiel aus früheren Kapiteln (3.1.2) erneut aufzugreifen, sei hier die Reaktionsgleichung aus (3.1.G) unter Zugabe von Sauerstoff angeführt:



$C(s)$... Kohlenstoff in fester Phase H_2 ... Diwasserstoff O_2 ... Disauerstoff

CO_2 ... Kohlenstoffdioxid H_2O ... Wasser

ΔH_r ... Reaktionsenthalpie $[\Delta H_r] = \frac{J}{\text{mol}}$ (hier bezogen auf 1 mol der Reaktanten)

Nur durch die Verwendung von Sauerstoff als Oxidationsmittel ist die Reaktionsenthalpie betragsmäßig um mehr als das 11-fache gestiegen. vgl. [(11)]

3.1.8 Brennstoffe

Als Brennstoffe werden alle Substanzen bezeichnet, bei deren Verbrennung Energie an die Umgebung abgegeben wird und so nutzbar gemacht werden kann. Findet eine vollständige Verbrennung statt, so wird Wasserstoff (H) in Wasser (H_2O) und Kohlenstoff in Kohlenstoffdioxid (CO_2) gewandelt. Wie bereits erläutert, haben beide dieser Produkte der Oxidationsreaktion große Bindungsenthalpien. Das bedeutet: Je mehr Wasserstoff oder Kohlenstoff pro Mol in einem Brennstoff gebunden ist, desto höher wird der Brennwert des Materials. vgl. [(9), S. 198f]

Brennstoff	Brennwert (kJ/g)
Holz (Kiefer)	18
Anthrazitkohle	31
Holzkohle	34
Rohöl	45
Benzin	48
Erdgas	49
Wasserstoff	142

Abbildung 4: Brennwerttabelle; vgl. [(9), Tabelle 5.5, S. 198]

3.2 Gasgesetze

Das folgende Kapitel fasst kurz die 3 Gasgesetze zusammen und erläutert wie durch diese die ideale Gasgleichung gebildet wird. Die Gasgesetze sind von entscheidender Bedeutung für Verbrennungsvorgänge, da die physikalischen Rahmenbedingungen bzw. die Art des Systems maßgeblich den Verlauf jeder Verbrennungsreaktion beeinflussen.

Durch das Experimentieren mit verschiedensten Gasen hat sich herausgestellt, dass zur Beschreibung des Zustandes eines Gases folgende vier Größen notwendig sind:

- Druck p gemessen in Pa
- Temperatur T gemessen in K
- Volumen V gemessen in l
- Gasmenge (gewöhnlich Stoffmenge) n gemessen in mol

Die Gasgesetze setzen diese 4 Größen in Beziehung zueinander. vgl. [(9), S. 387]

3.2.1 Druck-Volumen-Beziehung, das Boyle'sche Gesetz

Das Volumen einer gegebenen Menge Gas, das bei konstanter Temperatur gehalten wird, verhält sich umgekehrt proportional zum Druck. Das Volumen nimmt also zu, wenn der Druck sinkt und der Druck nimmt zu, wenn das Volumen abnimmt. vgl. [(9), S. 387]

$$pV = const. \quad (3.2.A)$$

p ... Druck [p] = Pa V ... Volumen [V] = l

3.2.2 Temperatur-Volumen-Beziehung, das Charles'sche Gesetz

Das Volumen einer festen Menge an Gas, das bei konstantem Druck gehalten wird, ist direkt proportional zu seiner absoluten Temperatur. Verdoppelt sich also die Temperatur, so verdoppelt sich auch das Gasvolumen. vgl. [(9), S. 388f]

$$\frac{V}{T} = const. \quad (3.2.B)$$

V ... Volumen [V] = l T ... Temperatur [T] = K

3.2.3 Menge-Volumen-Beziehung, das Avogadro'sche Gesetz

Gleiche Volumina von Gasen bei gleicher Temperatur und gleichem Druck enthalten dieselbe Anzahl von Molekülen. Das ist eine Folgerung aus der Avogadro'schen Molekülhypothese, die besagt, dass das Volumen eines Gases bei konstanter Temperatur und konstantem Druck direkt proportional zur Molzahl des Gases ist. vgl. [(9), S. 390f]

$$\frac{V}{n} = \text{const.} \quad (3.2.C)$$

V ...Volumen [V] = l n ...Molzahl [n] = mol

3.2.4 Die ideale Gasgleichung

Die drei gelisteten Gasgesetze beschreiben das Verhalten von Gasen unter bestimmten Randbedingungen, die über die vier genannten Größen: Druck p , Temperatur T , Volumen V und Gasmenge n vollständig beschrieben werden können. Die Proportionalitäten lassen sich dann wie folgt ausdrücken: vgl. [(9), S. 391]

$$V \propto \frac{nT}{p} \quad (3.2.D)$$

V ...Volumen [V] = l n ...Molzahl [n] = mol T ...Temperatur [T] = K p ...Druck [p] = Pa

Das Symbol \propto wird als „ist proportional zu“ gelesen. Die Proportionalitätskonstante wird Gaskonstante R genannt und (3.2.D) kann umgeschrieben werden in:

$$pV = nRT \quad (3.2.E)$$

V ...Volumen [V] = l n ...Molzahl [n] = mol T ...Temperatur [T] = K p ...Druck [p] = Pa

R ...Gaskonstante [R] = $8,314 \frac{J}{\text{mol K}}$

Die Temperatur muss in der idealen Gasgleichung immer als absolute Temperatur angegeben werden. Die Gasmenge wird üblicher Weise in Mol, der Druck in atm oder Pa und das Volumen in Liter angegeben. Die Einheit des Ausdrucks pV ist Joule und wird als die schon beschriebene Volumsarbeit bezeichnet. vgl. [(9), S. 391f]

Die ideale Gasgleichung beschreibt das Verhalten eines beliebigen Gases in vielen Zusammensetzungen und unter einer Vielzahl von äußeren Umständen und Gegebenheiten, ist aber nie exakt richtig für reale Gase. Die Abweichungen sind aber unter **STP** (Standard temperature and pressure) vor allem für CO_2 und andere relevante Gase so gering, dass sie vernachlässigt werden können. vgl. [(9), S. 392f]

3.3 Thermodynamik von Verbrennungsvorgängen

Dieses Kapitel ist als Erweiterung des ersten zu sehen und knüpft direkt an den ersten Hauptsatz der Thermodynamik an.

3.3.1 Wärmekapazität

Wird einem System Wärme zugeführt, so ändert sich seine Temperatur. Die *Wärmekapazität* C eines Systems beschreibt die Temperaturänderung ΔT , die stattfindet, wenn dem entsprechenden System eine Wärmemenge ΔQ zugeführt wird.vgl. [(14), S. 40f]

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (3.3.A)$$

C ...Wärmekapazität [C] = $\frac{J}{K}$ ΔT ...Temperaturänderung [ΔT] = K

ΔQ ...zugeführte Wärmemenge [ΔQ] = J

Damit lässt sich eine Formulierung für exotherme Reaktionen unter isobaren Zustandsänderungen finden: vgl. [(14), S. 42]

$$p = \text{const.}: \quad \Delta H = \Delta Q = C_p \Delta T \quad (3.3.B)$$

p ...Druck [p] = Pa ΔQ ...zugeführte Wärmemenge [ΔQ] = J ΔT ...Temperaturänderung [ΔT] = K

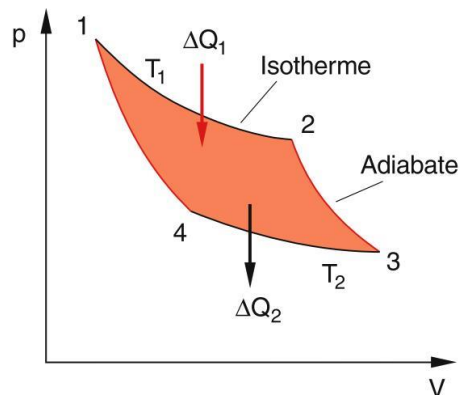
ΔH ... Enthalpieänderung [ΔH] = J C_p ...Wärmekapazität bei isobaren Prozessen [C_p] = $\frac{J}{K}$

3.3.2 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Experimentell hat sich gezeigt, dass Arbeit immer vollständig in Wärme umgesetzt werden kann. Umgekehrt ist es allerdings nicht möglich, Wärme vollständig in mechanische Arbeit um zu wandeln. Äquivalent kann die Formulierung auch lauten, dass Wärme von selbst immer nur vom wärmeren zum kälteren Körper fließt und nie umgekehrt. Dieser Sachverhalt, der ursprünglich nur auf Erfahrung und Beobachtung beruhte, wird als zweiter Hauptsatz der Thermodynamik bezeichnet. vgl. [(13), S. 313f] [(14), S. 42f]

3.3.3 Der Carnot'sche Kreisprozess

Um die Umwandlung von Wärme in Arbeit zu beschreiben, wird ein Gedankenexperiment durchgeführt, welches *Carnot'scher Kreisprozess* genannt wird. Dabei wird ein ideales Gas durch Expansion bzw. Kompression zwei isotherme Zustandsänderungen bzw. zwei adiabatische Zustandsänderungen durchführen, bis es wieder den Ausgangszustand erreicht hat. Es kann also eine quantitative Aussage über den Bruchteil an Wärme gemacht werden,



$p \dots \text{Druck } [p] = \text{Pa}$ $V \dots \text{Volumen } [V] = \text{l}$

Abbildung 5 : Carnotscher Kreisprozess ; [(10), S. 314]

der tatsächlich wieder in Arbeit umgewandelt werden kann. Zusätzlich lassen sich die Unterschiede zwischen reversiblen und irreversiblen Prozessen mit dem Carnot'schen Kreisprozess gut darstellen, aber dazu im folgenden Kapitel mehr. vgl. [(10), S. 314]

Der Druck p_1 , die Temperatur T_1 und das Volumen V_1 beschreiben den Zustand (p_1, T_1, V_1) des Systems am Startpunkt 1. Durch isotherme Expansion, also Expansion ohne Änderung der Temperatur, wird der Zustand (p_2, T_1, V_2) erreicht. Damit das möglich ist, muss eine Wärmemenge ΔQ_1 zugeführt werden, ansonsten würde sich die absolute Temperatur ändern. Anschließend erfolgt eine adiabatische Expansion um das System in Zustand 3 zu versetzen. Adiabatisch bedeutet, dass keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht wird, die Zustandsänderung ist also *wärmedicht*. Von Zustand 3 $(p_3, T_2 < T_1, V_3)$ ausgehend wird das System isotherm komprimiert und erreicht Zustand 4 (p_4, T_2, V_4) . Bei der Kompression muss Wärme entzogen werden, da nur so die Temperatur gleich bleiben kann. Die Wärmemenge ΔQ_2 wird abgegeben. Anschließend erfolgt noch eine weitere adiabatische Expansion und das System ist wieder im Ausgangszustand. Es handelt sich hierbei natürlich nur um eine ideale Vorstellung. Carnotmaschinen, denn so werden Maschinen dieser Art genannt, lassen sich in der Realität nicht so umsetzen. vgl. [(10), S. 314f]

Die Carnotmaschine hat also die Wärmemenge ΔQ_1 aufgenommen und die Arbeit ΔW an die Umgebung abgegeben. Die Nettoarbeit ergibt sich also über:

$$\Delta W = R \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) \quad (3.3.C)$$

ΔW ... abgegebene Arbeit [ΔW] = J R ... Gaskonstante [R] = 8,314 $\frac{J}{mol K}$ $T_{1,2}$... Temperatur [$T_{1,2}$] = K
 $V_{1,2}$... Volumen [$V_{1,2}$] = l

Maschinen, die Wärmeenergie in mechanische Arbeit wandeln, nennt man Wärmekraftmaschinen. Der Wirkungsgrad dieser Maschinen ist ein Verhältnis von aufgenommener Wärmemenge ΔQ_1 und abgegebener Arbeit ΔW . vgl. [(10), S. 315f]

$$\eta = \left| \frac{\Delta W}{\Delta Q_1} \right| = \frac{R \cdot (T_1 - T_2) \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)}{R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (3.3.D)$$

ΔW ... abgegebene Arbeit [ΔW] = J R ... Gaskonstante [R] = 8,314 $\frac{J}{mol K}$ $T_{1,2}$... Temperatur [$T_{1,2}$] = K
 ΔQ_1 ... aufgenommene Wärmemenge [ΔQ_1] = J $V_{1,2}$... Volumen [$V_{1,2}$] = l η ... Wirkungsgrad [η] = 1

Es ist aus dem resultierenden Quotienten in (3.3.D) ersichtlich, dass der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine immer kleiner als 1 sein muss. Die Wärme kann also nie vollständig in Arbeit umgesetzt werden. vgl. [(10), S. 317]

3.3.4 Reversible und Irreversible Zustandsänderungen

Reversible Prozesse bezeichnet man auch als *zeitinvariant*, weil bei der Beschreibung dieser Vorgänge t mit $-t$ ausgetauscht werden kann ohne gegen physikalische Gesetze zu verstoßen. Reversible bzw. zeitinvariante thermodynamische Prozesse erlauben es einem geschlossenen System in seinen Anfangszustand zurück zu kehren. vgl. [(10), S. 321] [(14), S. 43]

Eine Zustandsänderung eines abgeschlossenen Systems ist irreversibel, wenn ihre Umkehr zum Ausgangszustand nicht von alleine, sondern nur unter äußerer Einwirkung möglich ist. [(10), S. 322]

Bei allen makroskopischen *abgeschlossenen* Systemen kommen streng genommen keine reversiblen Zustandsänderungen vor, weil immer ein (wenn auch kleiner) Teil der Bewegungsenergie durch unvermeidliche Reibung in Wärme umgewandelt wird. [(10), S. 322]

3.3.5 Die Entropie

Man kann sowohl die Deutung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik als auch die Beschreibung von reversiblen bzw. irreversiblen Prozessen über die Einführung eines neuen Begriffs verändern. Führt man einem System bei einem infinitesimal kleinen Abschnitt eines reversiblen Prozesses bei der Temperatur T die Wärmemenge ΔQ zu, so nennen wir den Quotienten $\Delta Q/T$ die reduzierte Wärmemenge. [(10), S. 317-318] Beträge dieser reduzierten Wärmemengen hängen nicht vom Weg ab, dies ist eine Verallgemeinerung und gilt nicht nur für Carnotsche Kreisprozesse. Die auf einem infinitesimal kleinen Abschnitt eines Kreisprozesses abgegebene bzw. aufgenommen reduzierte Wärmemenge $\Delta Q/T$ wird als Änderung dS einer neu definierten Größe, der Entropie S , bezeichnet. vgl. [(10), S. 318]

$$dS = \frac{\Delta Q_{rev}}{T} \quad (3.3.E)$$

dS ... Änderung der Entropie [dS] = $\frac{J}{K}$ T ... Temperatur [T] = K

ΔQ_{rev} ... zugeführte bzw. abgegebene Wärmemenge in einem reversiblen Prozess = [ΔQ_{rev}] = J

Die Entropie ist wie Temperatur, Druck oder Enthalpie eine Zustandsgröße und beschreibt zusammen mit Druck, Volumen und Temperatur den Zustand eines Systems. Für den reversiblen Kreisprozess gilt: vgl. [(10), S. 318]

$$dS = 0 \quad \text{weil} \quad \frac{\Delta Q_1}{T_1} = -\frac{\Delta Q_2}{T_2} \quad (3.2.F)$$

dS ... Änderung der Entropie [dS] = $\frac{J}{K}$ $T_{1,2}$... Temperatur [$T_{1,2}$] = K

$\Delta Q_{1,2}$... zugeführte bzw. abgegebene Wärmemenge = [$\Delta Q_{1,2}$] = J

Bei einem reversiblen Kreisprozess bleibt die Entropie konstant. [(10), S. 318]

Die Entropieänderung eines idealen Gases bei reversibler Zustandsänderung lässt sich berechnen:

$$dS = \frac{\Delta Q_{rev}}{T} = \frac{\Delta U + p \cdot \Delta V}{T} \quad (3.3.G)$$

dS ... Änderung der Entropie [dS] = $\frac{J}{K}$ T ... Temperatur [T] = K p ... Druck [p] = Pa

ΔQ_{rev} ... zugeführte bzw. abgegebene Wärmemenge in einem reversiblen Prozess = [ΔQ_{rev}] = J

ΔU ... Änderung der inneren Energie [ΔU] = J ΔV ... Änderung des Volumens [ΔV] = l

Mit Zuhilfenahme des ersten Hauptsatzes für adiabatische Vorgänge und der idealen Gasgleichung bezogen auf ein Mol des Gases:

$$\Delta U = C_v \cdot \Delta T \quad \text{und} \quad p \cdot V_M = R \cdot T \quad (3.3.H)$$

ΔU ... Änderung der inneren Energie [ΔU] = J C_v ... Wärmekapazität bei isochoren Prozessen [C_v] = $\frac{J}{K}$

ΔT ... Temperaturänderung [ΔT] = K p ... Druck [p] = Pa V_m ... Volumen bezogen auf 1 mol [V_m] = l

R ... Gaskonstante [R] = $8,314 \frac{J}{mol K}$ T ... Temperatur [T] = K

ergibt sich:

$$dS = C_v \cdot \frac{\Delta T}{T} + R \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (3.3.I)$$

dS ... Änderung der Entropie [dS] = $\frac{J}{K}$ C_v ... Wärmekapazität bei isochoren Prozessen [C_v] = $\frac{J}{K}$

ΔT ... Temperaturänderung [ΔT] = K R ... Gaskonstante [R] = $8,314 \frac{J}{mol K}$ T ... Temperatur [T] = K

ΔV ... Volumsänderung [ΔV] = l V ... Volumen [V] = l

Nach Integration erhält man:

$$dS_{isobar} = C_v \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + R \cdot \frac{V_2}{V_1} \quad (3.3.J)$$

dS_{isobar} ... Änderung der Entropie bei isobaren Prozessen [dS_{isobar}] = $\frac{J}{K}$

C_v ... Wärmekapazität bei isochoren Prozessen [C_v] = $\frac{J}{K}$ $T_{1,2}$... Temperatur [$T_{1,2}$] = K

$$R \dots \text{Gaskonstante } [R] = 8,314 \frac{J}{\text{mol K}} \quad V_{1,2} \dots \text{Volumen } [V_{1,2}] = l$$

vgl. [(10), S. 318]

Analog erfolgen Berechnungen der Entropie für isochore Prozesse über die Formulierung des ersten Hauptsatzes für isochore Zustandsänderungen. Die Änderung der Entropie hängt, da die Entropie eine Zustandsgröße ist, nur von ihrem Anfangs- und Endzustand ab. Das ermöglicht eine Ermittlung der Entropie für Systeme mit irreversiblen Zustandsänderungen.

vgl. [(10), S. 318]

Man kann zur Bestimmung der Entropieänderung bei irreversiblen Prozessen einen an die Problemstellung angepassten reversiblen Ersatzprozess berechnen und so die Entropiezunahme der irreversiblen Prozesse ermitteln. Da diese Berechnungen wie erwähnt an das Problem angepasst werden müssen, sollen sie in dieser Arbeit nicht weiter beschrieben werden. Weiterführende Erklärungen und Beispiele befinden sich in den Lehrbüchern (DEMTRÖDER, W. *Experimentalphysik 1*) und (HEINTZ, A. *Thermodynamik. Grundlagen und Anwendungen*).

Zusammenfassend lässt sich mit den obigen Aussagen eine weitere äquivalente Formulierung des zweiten Hauptsatzes verfassen. Für abgeschlossene Systeme, d.h. Systeme, die also in keinem Wärmeaustausch mit ihrer Umgebung stehen, gilt:

$$(dS)_{rev} = 0 \quad \text{und} \quad (dS)_{irrev} > 0 \quad (3.3.K)$$

$$dS \dots \text{Änderung der Entropie } [dS] = \frac{J}{K}$$

vgl. [(14), S. 43]

3.3.6 Grundsätze der statistischen Thermodynamik

Die Thermodynamik beschreibt Eigenschaften von Materie in einem makroskopischen Zusammenhang. So können thermodynamische Eigenschaften von großen Mengen eines beliebigen Stoffes erklärt werden ohne die mikroskopischen Gegebenheiten mit in Betracht zu ziehen. Die statistische Thermodynamik stellt mit Hilfe statistischer Verfahren und der Wahrscheinlichkeitsrechnung einen Zusammenhang zwischen makroskopischer und mikroskopischer Betrachtung her.

vgl. [(9), S. 781]

Mit Verwendung der Gasgesetze und der Festlegung der relevanten Größen (p, V, T, n) kann eine beliebige Gasprobe auf mikroskopischer Ebene untersucht werden. So lässt sich beispielsweise feststellen, dass die Geschwindigkeit der Gasmoleküle einer bestimmten Verteilung folgt. Wird ein Mol eines Gases untersucht, so kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt jedem der $6,02214 \cdot 10^{23}$ Gasteilchen eine exakte Position und eine entsprechende Teilchengeschwindigkeit zugewiesen werden. Ein *Mikrozustand* beschreibt genau eine spezifische Kombination aus exakter Position und zugehöriger Geschwindigkeit jedes einzelnen Gasteilchens in der Probe für einen thermodynamischen Zustand. Wegen der enormen Anzahl an möglichen Mikrozuständen ist es nicht möglich, alle nach zu bilden, stattdessen bedient man sich der Wahrscheinlichkeitsrechnung. vgl. [(9), S. 781]

Jeder thermodynamische Zustand besitzt eine charakteristische Anzahl zugehöriger Mikrozustände, illustriert durch den Buchstaben W . Der Zusammenhang ergibt sich über die von Boltzmann entwickelte Gleichung: vgl. [(9), S. 782]

$$S = k \ln(W) \quad (3.3.L)$$

$$S \dots \text{Entropie } [S] = \frac{J}{K} \quad k \dots \text{Boltzmannkonstante } [k] = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$$

$$W \dots \text{Anzahl der Mikrozustände } [W] = 1$$

Deshalb ist die Entropie ein Maß dafür, wie viele Mikrozustände einem bestimmten makroskopischen Zustand zugeordnet sind. [(9), S. 782]

Eine Entropieänderung geht mit einer Änderung der Temperatur, des Volumens oder der Anzahl an beweglichen Teilchen einher und kann folgendermaßen mathematisch beschrieben werden:

$$dS = k \ln(W_{Ende}) - k \ln(W_{Anfang}) = k \ln \frac{W_{Ende}}{W_{Anfang}} \quad (3.3.M)$$

$$dS \dots \text{Änderung der Entropie } [dS] = \frac{J}{K} \quad k \dots \text{Boltzmannkonstante } [k] = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$$

$$W_{Anfang,Ende} \dots \text{Anzahl der Mikrozustände } [W_{Anfang,Ende}] = 1$$

vgl. [(9), S. 782]

Wenn also von der Entropie als Zunahme der Unordnung oder der Vergrößerung des Chaos gesprochen wird, muss berücksichtigt werden, dass diese Umschreibungen im Wesentlichen

nur darauf beruhen, dass eine größere Zahl an Mikrozuständen eingenommen werden kann.
vgl. [(9), S. 783]

3.3.7 Dritter Hauptsatz der Thermodynamik

Der dritte Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass die Entropie eines reinen kristallinen Stoffes am absoluten Nullpunkt (0 K) als 0 angenommen werden kann: $S(0\text{ K}) = 0$.
vgl. [(9), S. 787]

Untersucht man reine kristalline Stoffe bei sehr niedrigen Temperaturen, so lässt sich feststellen, dass die Änderung der Entropie nie mit der stofflichen Zusammensetzung oder der Kristallmodifikation reiner Stoffe zusammenhängt. Daraus kann gefolgert werden, dass die Entropie reiner Stoffe, bei Annäherung an den absoluten Nullpunkt, dem selben Grenzwert entgegen strebt: vgl. [(10), S. 327]

$$\lim_{T \rightarrow 0} S(T) = 0 \quad (3.3.N)$$

$$S \dots \text{Entropie } [S] = \frac{J}{K} \quad T \dots \text{Temperatur } [T] = K$$

Wird die statistische Thermodynamik mit einbezogen, so lässt sich der dritte Hauptsatz auch wie folgt definieren. Der thermodynamische Gleichgewichtszustand am absoluten Nullpunkt kann über einen einzigen Mikrozustand ($W=1$) beschrieben werden.

vgl. [(9), S. 787f] [(10), S. 327]

3.3.8 Die freie Enthalpie

Um die Spontanität von verschiedensten Prozessen vorherzusagen, wurde eine von J. Willard Gibbs definierte neue Größe, die *freie Enthalpie* in der Thermodynamik etabliert. Gibbs Entdeckungen basieren auf dem Wissen, dass spontane endotherme Prozesse immer die Entropie des Systems erhöhen und spontane exotherme Prozesse die Entropie senken. Um eine Möglichkeit zu schaffen, brauchbare Vorhersagen über die Spontanität von Prozessen, die unter konstantem Druck und konstanter Temperatur ablaufen, zu treffen, wurde von Gibbs eine Zustandsfunktion, die sogenannte *Gibbs Enthalpie*, *freie Enthalpie* oder auch *Gibbs-Energie* eingeführt. Die freie Enthalpie G wird definiert als

$$G = H - TS. \quad (3.3.O)$$

G ... Gibbs Enthalpie [G] = J S ... Entropie [S] = $\frac{J}{K}$ T ... Temperatur [T] = K

H ... Enthalpie [H] = J

Läuft der betrachtete Prozess unter konstanter Temperatur ab, so gibt man die Änderung der Freien Enthalpie folgendermaßen an:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot dS \quad (3.3.P)$$

ΔG ... Änderung der Gibbs Enthalpie [ΔG] = J dS ... Änderung der Entropie [S] = $\frac{J}{K}$

ΔH ... Änderung der Enthalpie [ΔH] = J T ... Temperatur [T] = K

vgl. [(9), S. 791f]

Das Vorzeichen der Änderung der freien Enthalpie ΔG liefert Informationen über die Spontanität des jeweiligen Prozesses. Sind Temperatur und Druck konstant, so können folgende Informationen aus dem Vorzeichen der Gibbs-energie entnommen werden:

- Ist ΔG negativ, so verläuft die Hinreaktion spontan.
- Ist ΔG betragsmäßig gleich null, so liegt ein Gleichgewicht vor.
- Ist ΔG positiv, so verläuft die Hinreaktion nicht spontan, es muss also Arbeit zugeführt werden, die Rückreaktion verläuft hingegen spontan.

vgl. [(9), S. 792]

Genau genommen lehrt uns die Thermodynamik, dass die bei einem Prozess stattfindende Änderung der freien Enthalpie, ΔG , dem Maximum an nutzbarer Arbeit entspricht, das bei einem spontanen, bei konstanter Temperatur und unter konstantem Druck ablaufenden Prozess vom System auf seine Umgebung ausgeübt werden kann. [(9), S. 794]

Für spontane Prozesse beschreibt die freie Enthalpie also jene Energieänderung, die genutzt werden kann, um Arbeit zu verrichten. Für nicht spontane Prozesse beschreibt die freie Enthalpie hingegen die minimale Arbeit, die notwendig ist, um den Prozess bzw. die Reaktion zu starten.

vgl. [(9), S. 794]

3.4 Wärmetransport

Der Austausch von Wärmeenergie nimmt Einfluss auf alle physikalischen Vorgänge, die nicht unter idealisierten Bedingungen ablaufen. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel alle Vorgänge beschrieben, die für einen Transport von Wärmeenergie verantwortlich sein können.

Grundsätzlich findet ein Austausch zwischen zwei Systemen nur dann statt, wenn diese unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Der Transport von Energie erfolgt dann stets vom System, das die höhere Temperatur aufweist, zum System mit der niedrigeren Temperatur. Die drei fundamentalen Mechanismen werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

vgl. [(10), S. 292]

3.4.1 Wärmeleitung

Wärmeleitung tritt in festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen auf. Sie ist also an das Vorhandensein von, und die Interaktion zwischen Materie gebunden. Wärmeleitung beschreibt eine reine Übertragung von Energie. Ein Materieaustausch findet also normalerweise nicht statt. vgl. [(10), S. 293f]

Der Energietransport ist abhängig von der Wechselwirkung zwischen Atomen oder Molekülen, die selbst keinem Transportprozess ausgesetzt sind. Wird ein System einseitig einer höheren Temperatur ausgesetzt, so schwingen die Atome mit höherer Energie und geben diese durch Stöße an andere Atome weiter. In Metallen wird dieser Effekt durch die Stöße freier Ladungsträger verstärkt. vgl. [(15), S. 632]

Zur genaueren Erläuterung der Wärmeleitung wird nun das Modell eines zylindrischen Körpers verwendet, welcher einen konstanten Querschnitt aufweist (siehe Abbildung 6). Die zwei Enden des Stabes weisen unterschiedliche Temperaturen auf, daher findet ein Transport von Wärmeenergie statt.

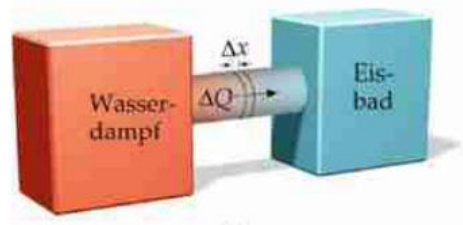


Abbildung 6: Modell zur Erläuterung des Wärmeleitung; vgl. [(15), S. 632, Abbildung 17.1 a)]

Der *Temperaturgradient* ist ein Vektor und beschreibt die Temperaturänderung ΔT pro Längeneinheit Δx . Als Gradient weist er auch die Eigenschaft eines Gradienten auf und so entspricht seine Richtung jener Richtung der größten Temperaturänderung. vgl. [(15), S. 632]

Die in Abbildung 6 verzeichnete Länge Δx beschreibt einen infinitesimal kleinen Längenabschnitt des Stabes, über dessen Länge im stationären Zustand eine Temperaturdifferenz von ΔT vorliegt. In einem stationären Zustand nimmt die Temperatur auf Grund der konstanten Querschnittsfläche gleichmäßig zum kälteren Ende hin ab. Wird in einer Zeit Δt die Wärmemenge ΔQ übertragen, dann beschreibt der Quotient $\Delta Q/\Delta t$ die Geschwindigkeit, mit der die Wärmeenergie übertragen wird. Diese Größe nennt man *Wärmestrom* und sie wird wie folgt beschrieben:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.4.A)$$

I ... Wärmestrom [I] = W ΔQ ... Wärmemenge [ΔQ] = J

Δt ... Zeitintervall [Δt] = s λ ... Wärmeleitfähigkeit [λ] = $\frac{J}{msK}$

A ... Querschnittsfläche [A] = m² ΔT ... Temperaturdifferenz [ΔT] = K

Δx ... infinitesimaler Längenabschnitt [Δx] = m

vgl. [(15), S. 632]

Mit Hilfe der Wärmeleitfähigkeit können die thermischen Eigenschaften von Materialien und Werkstoffen verglichen werden. Oft verwendet man jedoch andere charakteristische Eigenschaften, die sich aus der Wärmeleitfähigkeit ableiten lassen, wie zum Beispiel den *Wärmewiderstand*:

$$R = \frac{|\Delta x|}{\lambda A} \quad (3.4.B)$$

R ... Wärmewiderstand [R] = $\frac{K}{W}$ Δx ... infinitesimaler Längenabschnitt [Δx] = m

λ ... Wärmeleitfähigkeit [λ] = $\frac{J}{msK}$ A ... Querschnittsfläche [A] = m²

In der Praxis ist oft der Wärmestrom durch mehrere Schichten unterschiedlicher Materialien zu bestimmen. Diese Berechnung wird mit dem Wärmewiderstand all dieser Schichten und dem Temperaturunterschied durchgeführt. vgl. [(15), S. 632f]

Da die exakte Berechnung von Wärmewiderständen weder Teil der Schulcurricula ist, noch große Bewandnis für die später folgenden Experimente hat, wird hier nur auf weiterführende

Fachliteratur verwiesen, siehe TIPLER, P.A., G. MOSCA und J. WAGNER. *Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure*. 7. Seite 633-638.

Wärmeleitung ist abhängig vom Aggregatzustand der betrachteten Substanzen. In Flüssigkeiten treten keine Scherkräfte auf, daher sind benachbarte Moleküle schwächer gekoppelt als in Festkörpern. Das hat Auswirkungen auf den Wärmetransport. Die kinetische Energie der Moleküle wird wesentlich langsamer weitergegeben. Elektrisch leitende Flüssigkeiten besitzen freie Ladungsträger, die wie bei Metallen, den Wärmeleitungsprozess maßgeblich beeinflussen. Leitende Flüssigkeiten haben daher immer auch bessere wärmeleitende Eigenschaften als nicht leitende Flüssigkeiten. Gase weisen generell eine viel geringere Moleküldichte als Flüssigkeiten oder Festkörper auf. Da die Wärmeleitung wesentlich von Molekülstößen abhängt, lässt sich durch die geringe Dichte bereits die deutlich schlechtere Wärmeleitung von Gasen erklären. Wasserstoff besitzt die besten Wärmeleitungseigenschaften. Mit zunehmender Molekülmasse sinkt die Wärmeleitung weiter. Ist zusätzlich die mittlere freie Weglänge, jene Länge also, die von Molekülen im Mittel zurückgelegt werden kann, ohne mit anderen Molekülen oder Atomen zu kollidieren, klein genug gegenüber der geometrischen Dimensionierung des Gasbehältnisses, so ist die Wärmeleitung unabhängig vom Druck.

vgl. [(10), S. 297f]

Es folgen ein paar Referenzwerte für die Wärmeleitung verschiedener Stoffe:

Luft bei 27° C ... 0,026 $\frac{W}{mK}$ Wasser bei 27° C ... 0,609 $\frac{W}{mK}$ Stahl bei 20° C ... 46 $\frac{W}{mK}$

Kupfer bei 20°C ... 401 $\frac{W}{mK}$ Silber bei 20° C ... 429 $\frac{W}{mK}$

Hartholz bei 20° C ... 0,15 $\frac{W}{mK}$ Glas bei 20° C ... 0,7 bis 0,9 $\frac{W}{mK}$

vgl. [(15), S. 633, Tabelle 17.1]

3.4.2 Konvektion

So wird eine Art des Wärmetransports genannt, die mit einer Bewegung von Materie zusammenhängt. Konvektion spielt in der Atmosphäre unseres Planeten eine wichtige Rolle. Durch sie entstehen lokale Unterschiede im Luftdruck und so können sich Hoch- bzw. Tiefdruckgebiete bilden. Das Prinzip der Konvektion lässt sich einfach erklären, aber äußerst

schwer berechnen. Wird ein Gas oder ein Fluid erwärmt, sinkt dessen Dichte und es steigt über kältere Schichten des eigenen Materials auf. Ist der Temperaturgradient eines Fluids oder eines Gases groß genug, können sogar weit heftigere Strömungen entstehen, die große Mengen Materie transportieren. Durch Konvektion entstehende Strömungen können laminar oder turbulent sein. vgl. [(10), S. 293] [(15), S. 638]

Eine interessante Eigenschaft der Konvektion ist, dass über Materieströmungen Temperaturunterschiede sehr schnell ausgeglichen werden können. Dieser Effekt wird zum Beispiel bei Fensterscheiben unterbunden, indem die Luftschicht zwischen zwei Scheiben möglichst klein gehalten wird. Glas ist ein wesentlich besserer Wärmeleiter als Luft und würde ohne die Luftschicht keine nennenswerten Isolationseigenschaften aufweisen. Würde die Luftschicht also zwischen den Scheiben zu groß werden, so könnte ein Wärmetransport auf Grund der Konvektion erheblich einfacher ablaufen. vgl. [(15), S. 638]

Die von einem Gegenstand durch Konvektion in seine Umgebung übertragene Wärmemenge ist etwa proportional zu seiner Oberfläche und zur Temperaturdifferenz gegenüber dem ihn umgebenden fluiden Medium. [(15), S. 638]

3.4.3 Wärmestrahlung

Jeder Körper steht im ständigen Wärmeaustausch mit seiner Umgebung. Ist ein Wärmetransport durch Wärmeleitung oder Konvektion, auf Grund von fehlender Materie nicht möglich, so ist das Emittieren und Absorbieren von elektromagnetischer Strahlung die einzige Möglichkeit, Wärmeenergie zu tauschen. Die abgestrahlte Energie ist dabei von der Oberfläche und der absoluten Temperatur des Körpers abhängig und wird Wärmestrahlung oder thermische Strahlung genannt. Dieser Zusammenhang wird mit dem *Stefan-Boltzmann'schen Gesetz* erklärt:

$$P_e = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (3.4.C)$$

P_e ... emittierte Leistung [P_e] = W ε ... Emissionsgrad der Oberfläche [ε] = $[0 \leq \varepsilon \leq 1]$

T ... absolute Temperatur [T] = K A ... Oberfläche [A] = m^2

σ ... Stefan – Boltzmann – Konstante [σ] = $\frac{W}{m^2 K^4}$

vgl. [(15), S. 638f]

Die Stefan-Boltzmann-Konstante hat den Wert:

$$\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} . \quad (3.4.D)$$

vgl. [(15), S. 639]

Da elektromagnetische Strahlung auch absorbiert wird, gibt es für die Absorption eine eigene Variation des *Stefan-Boltzmann'schen Gesetzes*. Dieses beinhaltet statt des Emissionsgrades (ϵ) den Absorptionsgrad (α), welcher ebenfalls Werte zwischen 1 und 0 annimmt. Mit der folgenden Formel lässt sich also die absorbierte Strahlungsleistung berechnen:

$$P_a = \alpha \sigma A T_0^4 \quad (3.4.E)$$

P_a ... absorbierte Leistung [P_a] = W α ... Absorptionsgrad der Oberfläche [α] = [0 ≤ α ≤ 1]

T_0 ... Umgebungstemperatur [T_0] = K A ... Oberfläche [A] = m²

σ ... Stefan – Boltzmann – Konstante [σ] = $\frac{W}{m^2 K^4}$

vgl. [(15), S. 639]

Absorptionsgrad und Emissionsgrad sind unterschiedliche materialabhängige Größen, die ebenso von der Strahlungsrichtung und der Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung abhängen. Wird die Strahlungsrichtung vernachlässigt, lässt sich die Nettostrahlungsleistung eines Körpers über die zwei Varianten des *Stefan-Boltzmann'schen Gesetzes* berechnen:

$$\Delta P = P_e - P_a \quad (3.4.F)$$

P_e ... emittierte Leistung [P_e] = W P_a ... Absorbierte Leistung [P_a] = W

ΔP ... Nettostrahlungsleistung [ΔP] = W

Die obige Formel beschreibt also die Nettostrahlungsleistung eines Körpers mit der absoluten Temperatur T , der sich in einer Umgebung mit der Temperatur T_0 befindet. Strahlt ein Körper mehr Leistung ab, als er selbst absorbiert, so kühlt er selbst ab, während er seine Umgebung

erhitzt. Wird mehr Leistung absorbiert als emittiert, so erwärmt er sich. Körper, deren Emissionsvermögen den Wert 1 hat, nennt man schwarze Körper. vgl. [(15), S.639]

3.4.4 Schwarze Körper

Schwarze Körper werden auch als ideale Strahler bezeichnet. Diese Bezeichnung wird verwendet, da der Emissionsgrad eines schwarzen Körpers 1 ist und er daher von allen Körpern gleicher Temperatur das höchste Emissionsvermögen aufweisen muss.

vgl. [(10), S. 302f]

Um das Strahlungsverhalten eines schwarzen Körpers zu realisieren, wird das Prinzip der *Hohlraumstrahlung* ausgenutzt, siehe Abbildung 7. Dafür ist ein Hohlraum notwendig, dessen Öffnungsfläche möglichst klein im Verhältnis zur gesamten inneren Oberfläche ist. Durch starkes Erhitzen des Materials wird die, in den Hohlraum emittierte elektromagnetische Strahlung, mehrmals an der Innenseite reflektiert, bevor sie die Möglichkeit hat wieder durch die

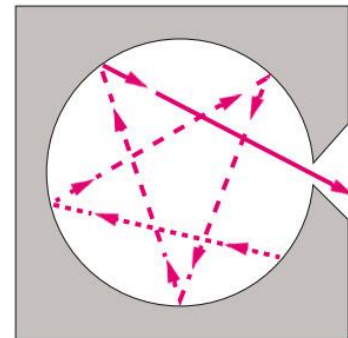


Abbildung 7: Hohlraumstrahlung; eigenes Bild, vgl. [(15), S.639, Abbildung 17.5]

kleine Öffnung auszutreten. Bei ausreichend hoher Temperatur des Materials, in dem sich der Hohlraum befindet, stellt die Öffnung eine Strahlungsquelle mit maximalem Emissionsvermögen aller Körper mit gleicher Temperatur dar. Durch die Hohlraumstrahlung kann also das Verhalten eines schwarzen Körpers nachgestellt werden.

vgl. [(2), S. 74] [(10), S. 306]

Wird die Temperatur eines Körpers erhöht, so nimmt dessen emittierte Strahlungsleistung zu und die Wellenlänge wird kürzer. Diese Abhängigkeit wird in Abbildung 8 mittels drei verschiedenen Temperaturwerten dargestellt. vgl. [(15), S. 639]

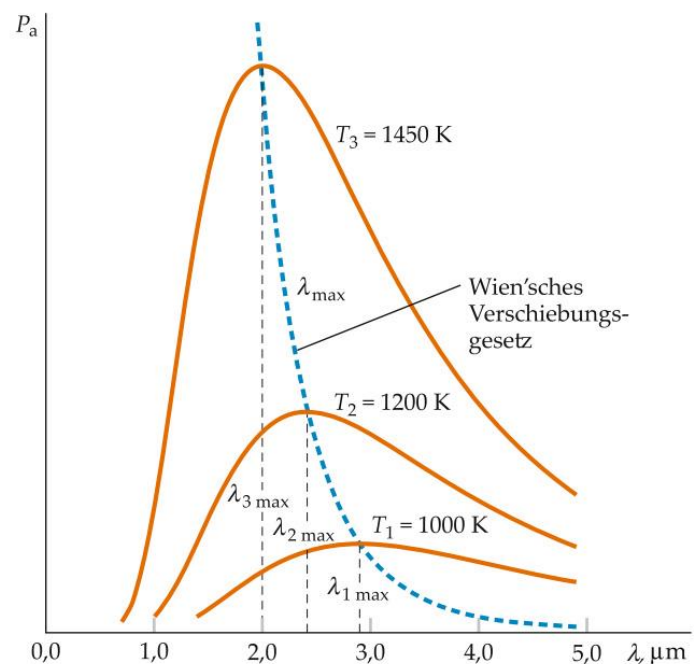
Die Wellenlänge des Maximums ist umgekehrt proportional zur Temperatur. Diesen Sachverhalt nennt man *Wien'sches Verschiebungsgesetz*. [(15), S. 639] Es kann mathematisch folgendermaßen formuliert werden:

$$\lambda_m = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T} \quad (3.4.G)$$

λ_m ... Wellenlänge des Maximums [λ_m] = μm T ... Temperatur der Oberfläche [T] = K

vgl. [(15), S. 639]

Mit Hilfe des Wien'schen Verschiebungsgesetzes können Oberflächentemperaturen von weit entfernten Sternen nur anhand ihrer Strahlungsleistung bestimmt werden. Es ist bekannt, dass Körper, die in sichtbarem Licht nicht schwarz erscheinen, im Infrarotbereich sehr wohl als schwarze Körper wirken können. vgl. [(15), S. 640]



P_a ... absorbierte Leistung [P_a] = W λ ... Wellenlänge [λ] = μm

Abbildung 8: Wellenlängenabhängigkeit der Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers; vgl. [(15), S. 640, Abbildung 17.6]

3.5 Das Feuer

In diesem Kapitel soll die Frage geklärt werden, wie Feuer physikalisch bzw. chemisch beschrieben werden kann.

3.5.1 Was ist Feuer?

Feuer ist eine chemische Oxidationsreaktion, bei der Flammerscheinungen auftreten, welche einen Wärmetransport über Konvektion und Wärmeleitung möglich machen. vgl. [(16), S. 4] [(15), S. 638]



Abbildung 9: brennende Rückstände der Thermitreaktion; eigenes Bild

Der Begriff „Verbrennungsreaktion“ ist nicht eindeutig definiert. Man versteht darunter sowohl die Verbrennung von chemisch gebundener Energie bei Zellumwandlungs- und Verdauungsprozessen im menschlichen Organismus als auch heftige Oxidationsreaktionen, die unter Flammenbildung Wärmeenergie an ihr Umfeld abgeben. Die verwirrend wirkende Namensgebung ist verständlich, denn beide Vorgänge ähneln sich stark. Es handelt sich bei beiden um Oxidationsreaktionen, bei denen durch Verwendung von Sauerstoff, Umwandlungsprozesse stattfinden und chemisch gebundene Energie aus Brennstoffen umgewandelt wird. Die frei werdende Energie entspricht dabei

immer der Differenz der Bindungsenergien von Brennstoff und Oxidationsmittel. Die genauere Erklärung der entsprechenden Reaktionskinetik ist in Kapitel 3.1.5 zu finden. Ist eine Oxidationsreaktion in Gang gesetzt, reicht meistens die Reaktionsenergie aus, um den Brennstoff ausreichend zu erhitzen und die notwendige Temperatur aufrecht zu erhalten.

vgl. [(17), S. 385]

Ob und wie ein Feuer entfacht und aufrechterhalten werden kann, wird durch die Verfügbarkeit von Zündquellen, Brennstoff und Oxidationsmittel bestimmt. Fällt eine dieser Voraussetzungen weg, ist es nicht möglich einen Verbrennungsvorgang einzuleiten oder aufrecht zu erhalten.

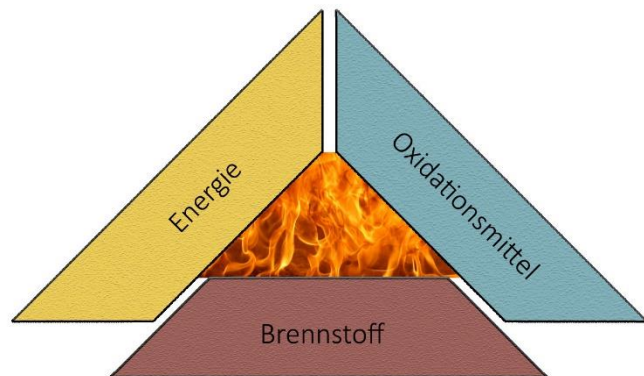


Abbildung 10: Das Verbrennungsdreieck; eigene Grafik

Dieser Zusammenhang wird im Verbrennungsdreieck illustriert. Um eine erfolgreiche Zündung des Brennstoffs zu gewährleisten, muss, abhängig vom Aggregatzustand, eine gewisse Temperatur erreicht werden. Diese Temperatur nennt man *Entzündungstemperatur*. Feste oder flüssige Brennstoffe müssen meist, bevor eine Verbrennung stattfinden kann, verdampft werden. Als *Flammpunkt* wird die niedrigste Temperatur bezeichnet, bei der eine brennbare Flüssigkeit gezündet werden kann. Ohne Energiezufuhr einer Zündquelle können die Gase nahe des Flammpunkts nicht selbsterhaltend weiterbrennen. Dafür ist es notwendig, den *Brennpunkt* des Gasgemisches zu überschreiten. Der Brennpunkt repräsentiert also jenen Temperaturwert, ab dem eine brennbare Substanz nach Zündung selbsterhaltend weiter brennt. Wird die *Zündtemperatur* erreicht oder überschritten, entzünden sich brennbare Substanzen ohne externe Zündquelle und brennen selbsterhaltend weiter, bis der Brennstoff ausgeht, die Sauerstoffzufuhr abreißt oder das Feuer in anderer Art und Weise gelöscht wird.

vgl. [(16), S. 8f] [(17), S.385]

3.5.2 Flammen und Flammentypen

Als Flammen oder Flammenerscheinung bezeichnet man jene Bestandteile eines Feuers, die sowohl Energie durch Wärmestrahlung als auch elektromagnetische Wellen im sichtbaren

Bereich abstrahlen. Man unterscheidet vier grundsätzlich verschiedene Typen von Flammen. Die Unterteilung erfolgt nach Mischungsart und Strömungsart. vgl. [(17), S. 386] [(14), S. 5]

- Laminare Vormischflammen

In laminaren Vormischflammen sind Oxidationsmittel und Brennstoff vorgemischt vorhanden und weisen ein laminares Strömungsverhalten auf. Vorgemischte Flammen brennen meist rußfrei. Beispiele für diesen Flammentyp sind Laborgasbrennerflammen und Bunsenbrennerflammen. Vorgemischte Flammen brennen *stöchiometrisch*, wenn sich Oxidationsmittel und Brennstoff vollständig verbrauchen und Kohlenstoffdioxid und Wasser freisetzen. Ist dieses Verhältnis nicht 1:1 und der Brennstoff im Überschuss vorhanden, nennt man die Verbrennung *fett*. Ist das Oxidationsmittel überschüssig vorhanden, heißt die Verbrennung *mager*.

vgl. [(14), S. 5f]

Ein weiterer sehr interessanter Aspekt von Vormischflammen ist ihre Fähigkeit abzuheben. Ist die laminare Flammgeschwindigkeit, die nur vom jeweiligen Gemisch, dem Druck und der Anfangstemperatur abhängt, kleiner als die Anströmgeschwindigkeit des Gases, so hebt die Flamme ab. vgl. [(14), S. 7]

- Turbulente Vormischflammen

Als turbulente Vormischflammen bezeichnet man Vormischflammen in einem turbulenten Geschwindigkeitsfeld. Durch die Turbulenzen entstehen viel höhere Wärmefreisetzungen als bei laminaren Vormischflammen. Solche Flammentypen sind vor allem dann erwünscht, wenn eine intensive Verbrennung auf minimalem Raum ablaufen soll. Beispielsweise ist das in Ottomotoren der Fall. Dadurch, dass Brennstoff und Oxidationsmittel vorgemischt vorliegen, sind höhere Sicherheitsmaßnahmen notwendig, um zu garantieren, dass das explosive Gemisch tatsächlich verbrennt. vgl. [(14), S. 5-8]

- Laminare nicht-vorgemischte Flammen

Hier werden Brennstoff und Oxidationsmittel erst während der Verbrennung gemischt und weisen ein laminares Strömungsverhalten auf. Da Oxidationsmittel und Brennstoff nicht vermischt sind, stellen sich oft unterschiedliche Brennzonen ein. Nahe am Brennstoff erfolgt eine fette Verbrennung und in größerer Entfernung und unter

höherer Verfügbarkeit des Oxidationsmittels läuft die Verbrennung mager ab. Ein Beispiel hierfür ist die Aufteilung der Brennzonen einer einfachen Kerzenflamme. Die in Abbildung 11 abgebildete Reaktionszone zeigt die Verbrennungsreaktion in der Nähe der stöchiometrischen Zusammensetzung. In der Reaktionszone findet also ein einigermaßen simultaner



Abbildung 11: Brennzonen einer Kerzenflamme; [(17), S. 386, Abbildung 8-10]

Verbrauch von Oxidationsmittel und Brennstoff statt. In der Dunkelzone überwiegt der Brennstoff und in der Leuchtzone das Oxidationsmittel. vgl. [(14), S. 8]

- Turbulente nicht-vorgemischte Flammen

Dieser Flammentyp beschreibt eine Verbrennung von nicht-vorgemischten Flammen in einem turbulenten Geschwindigkeitsfeld. Ähnlich wie bei den vorgemischten Flammen sind im turbulenten Fall intensivere Verbrennungen zu erwarten.

vgl. [(14), S. 8]

Unabhängig vom Flammentyp können Flammen so heiß werden, dass sie Teile des erhitzten Gases ionisieren. Deshalb spricht man bei der physikalischen Beschreibung von Feuer auch von einem partiellen Plasma. vgl. [(17), S. 386]

3.5.3 Plasma

Plasma wird als der vierte Aggregatzustand bezeichnet. Übergänge im Aggregatzustand finden in Materie bei Erhöhung oder Senkung des Drucks oder der Temperatur statt. Flüssigkeiten können verdunsten und Festkörper sublimieren. Wird die Temperatur weit über jene erhöht, die einen gasförmigen Zustand herbeiführen würde, so nähert sie sich der atomaren Ionisationsenergie an und ermöglicht die Ionisation von Atomen. Durch die hohe Temperatur stoßen Atome und Moleküle aneinander und werden von einigen ihrer Elektronen getrennt.

Diesen Prozess nennt man Ionisation. Ein elektrisch neutrales Gas entsteht, denn von außen betrachtet gleichen sich die Ladungen der Teilchen aus. Neben Molekülonen, Atomionen und Elektronen beinhalten Plasmen immer auch einen Anteil an einfachen Gasteilchen. Plasmen verhalten sich physikalisch anders als Gase, da sie durch den Anteil an freien Ladungsträgern elektrisch leitfähig werden und langreichweitige elektromagnetische Felder erzeugen. Diese Felder haben wiederum Einfluss auf das Plasma selbst. Jede Materie liegt bei ausreichend hoher Temperatur im Plasmazustand vor. Es handelt sich also um keine spezifische Eigenschaft von Gasen, die hohen Temperaturen ausgesetzt werden. vgl. [(17), S. 387] [(18), S. 1f]

In der Natur können Plasmen in Form von Blitzen oder Funken beobachtet werden. Durch starke elektrische Felder werden freie Elektronen so stark beschleunigt, dass diese durch Ionisationsstöße weitere Ladungsträger erzeugen. So entsteht ein Plasmakanal gut leitender Materie. Die Leuchterscheinung, die Blitz oder Funke genannt wird, entsteht durch die Rekombination der Ladungsträger. Dabei wird unter Abgabe von Photonen, Energie abgegeben. Eine Einteilung der Plasmen ist in Abbildung 12 dargestellt. vgl. [(18), S. 2f]

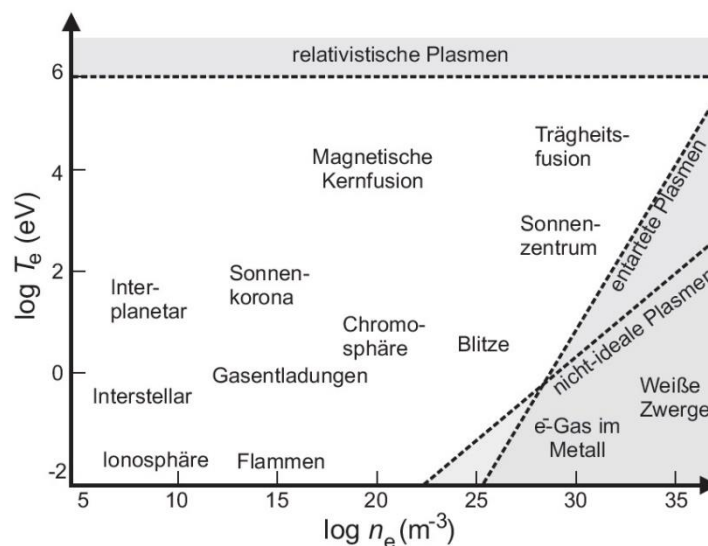


Abbildung 12: Einteilung von Plasmen in Dichte und Temperaturbereiche; [(18), S.3, Abbildung 1.1]

4 Experimente

4.1 Acetonoxidation durch Kupfer-Katalyse

Die Kupferkatalyse der Acetonoxidation zeigt ein beeindruckendes optisches Phänomen als Resultat einer Oxidationsreaktion des Acetons, die durch Kupfer in fester Phase katalysiert wird.

Materialien und Geräte:

- Aceton (CH_3COCH_3)
- Kupferspule (Ø ca. 2,5 mm) oder Kupfermünze
- Laborgasbrenner (Butan, Propan)
- Stativmaterial
- Glasbehältnis

Durchführung und Beobachtungen:

Das Stativ muss so eingestellt werden, dass die Kupferspule möglichst schnell wenige Millimeter über dem Aceton in einem Glasbehältnis platziert werden kann. Eine kleine Menge Aceton (ca. 40 ml) wird in das Glas gefüllt und die Kupferspule wird mit dem Laborgasbrenner erhitzt, bis sie rötlich glüht. Jetzt wird die glühende Spule in das vorher exakt ausgerichtete Stativ eingehängt und es kann unverzüglich eine stark schwankende Helligkeit des glühenden Drahtes beobachtet werden.

Erklärung:

Das beobachtete Phänomen kann mit Hilfe folgender Reaktionsgleichung der Acetonoxidation erklärt werden:

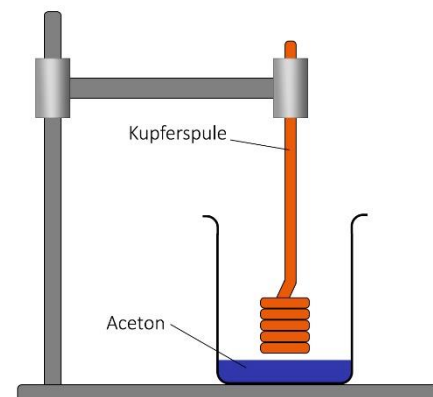
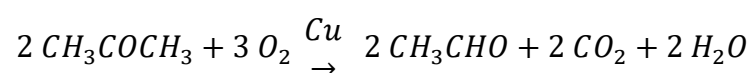


Abbildung 13: Aufbau : Kupferkatalyse der Acetonoxidation ; eigene Grafik



Abbildung 14: Optischer Effekt der Katalysereaktion ; eigenes Bild

Das Kupfer der Spule wird zuerst selbst oxidiert. Das entstandene Kupferoxid (CuO) gibt seinen Sauerstoff dann an das Aceton im Glasbehältnis ab und kann wieder oxidiert werden. Wird Kupfer oxidiert, so verfärbt sich die Oberfläche der Spule dunkel. Nach Abgabe des Sauerstoffs an das Aceton bleibt das pure Kupfer zurück, das Aceton wird oxidiert und durch die Freisetzung der Reaktionsenergie glüht das Kupfer auch nach dem Erhitzen mit dem Brenner mehrmals erneut auf. Dieser Prozess kann als wechselndes Farbspiel auf der Oberfläche der Kupferspule beobachtet werden, bis die thermische Energie des erhitzten Kupfers nicht mehr ausreicht, um eine Oxidationsreaktion des Acetons zu katalysieren.

vgl. [(19), S. 426]

Besondere Sicherheitshinweise:

Aceton ist ein halogenfreies Lösungsmittel und muss den geltenden Sicherheits- und Entsorgungsvorschriften gemäß entsorgt werden.

Video:



[Link zum Video](#)

4.2 Brennende Stahlwolle

Auch Metalle können brennen. Diese Verbrennungsvorgänge können dann stattfinden wenn die Oberfläche im Vergleich zur Materialstärke und die Sauerstoffzufuhr hinreichend groß sind. Am besten lässt sich diese Oxidationsreaktion mit Stahlwolle demonstrieren.

Materialien und Geräte:

- Stahlwolle in verschiedenen Stärken (00, 2)
- Feuerzeug, Batterie oder Gasbrenner
- Handschuhe und Zange



Abbildung 15: Brennende Stahlwolle; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Die Stahlwolle sollte vor dem Entzünden etwas aufgefächert werden, um eine höhere Sauerstoffzufuhr zu gewährleisten. Die Wolle wird kurz nach dem Entzünden bereits sehr heiß, es ist unbedingt mit einer Zange und Handschuhen zu arbeiten. Bei der Oxidationsreaktion kann beobachtet werden, wie verschiedenste einzelne Stränge der Wolle ausgehend von der Zündquelle oxidiert werden. Die Rückstände sind sehr porös und enthalten noch spitze Eisenfragmente, die leicht in die Haut eindringen können, sie sollten daher sorgfältig entsorgt werden.

Erklärung:

Die große Oberfläche der Stahlwolle ermöglicht eine durch Sauerstoffzufuhr aus der Luft geregelte Oxidationsreaktion. Wird die Menge an zugeführtem Sauerstoff erhöht, so fällt auch die Reaktion heftiger aus. Die Entzündung kann auch mittels eines Kurzschlussstroms einer 9 V-Batterie erreicht werden. Der Widerstand der Drahtstränge reicht aus, um diese so stark zu erhitzen, dass eine vollständige Oxidation eintritt.

Video:



[Link zum Video](#)

4.3 Die brennende Hand

Ein Experiment, das rein optisch einem Zaubertrick nahe kommt. Butanblasen werden in der Hand entzündet und die Flammen können mehrere Sekunden in den Händen gehalten werden.

Materialien und Geräte:

- Butangas für Feuerzeuge mit Füllstutzen
- Geschirrspülmittel
- Glasbehältnis
- Feuerzeug



Abbildung 16: Entzünden von Butangasblasen in der Hand; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Ein flaches Glasgefäß wird wenige Zentimeter hoch mit Wasser gefüllt. Das Wasser wird durch Zugabe von Spülmittel zu einer Seifenmischung vermenget. In diese Mischung wird vorsichtig das Butangas durch sanftes Andrücken des Füllstutzens an die Unterseite des Glasbehältnisses eingefüllt. Die Mischung sollte nun Blasen werfen. Diese Blasen können mit einer, vorher mit Wasser benetzten, Hand aufgenommen und entzündet werden.

Erklärung:

Butangas ist leicht entzündlich, würde sich aber in der Raumluft sofort verflüchtigen. Um das Gas einzufangen, wird die Seifenwassermischung verwendet. Wird das Gas unter die Oberfläche des Wassers eingefüllt, wirft es durch das Spülmittel in der Mischung Blasen und wird von diesen an der Verflüchtigung gehindert. Durch die Zündung mittels Feuerzeug verbrennt das Gas und das Wasser der Mischung schützt die Hand vor Verbrennungen. Wasser besitzt, im Vergleich zu anderen Flüssigkeiten, eine relativ hohe Verdampfungswärme. Die Energie die zum Verdampfen benötigt wird, kann im Verbrennungsprozess nicht in Wärme umgewandelt werden. So steigt zwar die wahrnehmbare Temperatur auf der Handfläche an, aber es kommt nicht zu Verbrennungen. vgl. [(9) S, 428]

Besondere Sicherheitshinweise:

Wenn auch keine ernste Gefahr besteht sich zu verbrennen, wird die Hand trotzdem sehr warm. Durch Schließen der Faust oder Schütteln der Hand kann das Feuer jederzeit sofort erstickt werden. Ebenso ist es wichtig, die Hand sowie den Unterarm sorgfältig mit Wasser an-zu-feuchten, bevor das Experiment durchgeführt werden darf. Es ist ebenso darauf zu achten, sich nicht über die Hand zu beugen, da die entstehenden Flammen höher und intensiver ausfallen als meist erwartet. Die entstehenden Flammen sind nach der Zündung am größten und es ist darauf zu achten, die Hände vom Körper weg zu strecken.

Video :



[Link zum Video](#)

4.4 Wiederentzünden einer Kerze über ihre Rauchsäule

Ein ebenso spektakuläres wie einfaches Experiment, das essentielle Eigenschaften von Verbrennungsvorgängen der Kerze auf eindrucksvolle Art und Weise demonstriert. Es ist möglich eine bereits gelöschte Kerze über ihre Rauchsäule wieder zu entzünden.

Materialien und Geräte:

- Kerze und Zünder
- Löffel oder Glasröhrchen

Durchführung und Beobachtungen:

Eine Kerze wird entzündet und nach kurzer Zeit mittels eines Löffels, Glasröhrchens

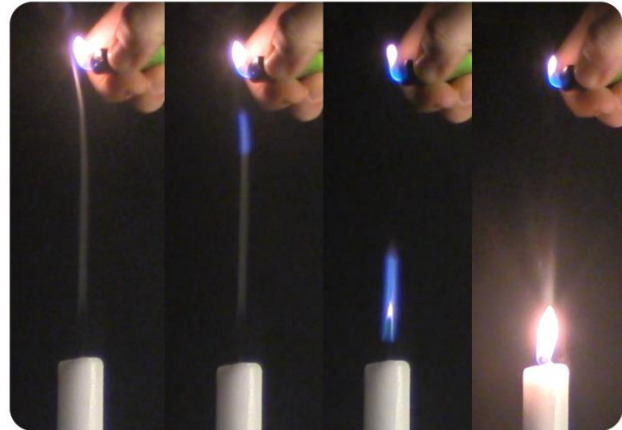


Abbildung 17: Kerze über Rauchsäule wieder entzünden; eigenes Bild

oder eines Objekts durch Abschneiden der Sauerstoffzufuhr gelöscht. Wichtig ist dabei, dass die entstehende Rauchsäule keinerlei Luftzirkulation ausgesetzt wird und immer Kontakt mit dem Docht besteht. Die Rauchsäule kann nun auf einer beliebigen Höhe mit dem Feuerzeug entzündet werden. Ist die Rauchsäule ausreichend ruhig und in Kontakt mit dem Docht, so wird eine Flamme ausgehend vom Zünder zum Docht wandern und diesen wieder entzünden. Es erscheint so, als würde die Flamme vom Zünder zum Docht überspringen.

Erklärung:

Nach dem Löschen einer Kerze ist der Docht noch heiß genug, um Wachs zu verdampfen und es entsteht eine Rauchsäule aus nicht verbrannten, stark abgekühlten Wachspartikeln. Dieses Gemisch ist brennbar und kann durch erneutes Entzünden zur Verbrennung gebracht werden. Ist die Rauchsäule noch in Kontakt mit dem Docht, so verbrennt das Gemisch, bis es den Docht erreicht und diesen ebenfalls entzündet.

Video:



[Link zum Video](#)

4.5 Die schlechte Wärmeleitung von Stahl

Um die schlechte Wärmeleitung von Stahl zu demonstrieren, wird ein Stahlstab mit dem Laborgasbrenner erhitzt.

Materialien und Geräte:

- Laborgasbrenner
- Stahlstab

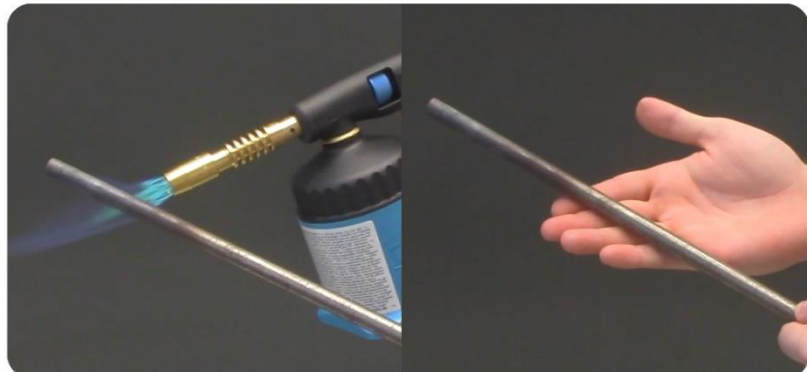


Abbildung 18: Wärmeleitung von Stahl; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Der Stahlstab wird an einem Ende entweder mit bloßen Händen oder in einer Stativvorrichtung fixiert und an dem anderen Ende mit dem Laborgasbrenner bis zur Rotglut erhitzt. Der Stab kann unmittelbar nach dem Erhitzen, wenige Zentimeter neben der Stelle, an der die Flamme auf sie einwirkte, berührt werden. Vorsichtig kann versucht werden sich näher an den oberen Rand des Stabes heran zu tasten.

Erklärung:

Stahl ist ein Metall und hat natürlich wärmeleitende Eigenschaften, allerdings sind diese weitaus geringer als bei anderen Metallen wie zum Beispiel Kupfer oder Eisen. Die Wärmeleitung λ von Stahl beträgt ca. $50 \frac{J}{msK}$ und ist damit um ein Vielfaches kleiner als die von Kupfer ($\lambda = 400 \frac{J}{msK}$). Dieser Umstand ermöglicht es, den Stahlstab nahe der Einwirkstelle des Laborgasbrenners anzufassen.

Besondere Sicherheitshinweise:

Durch die geringe Wärmeleitung im Stahlstab kann der Stab zwar nahe der heißesten Stelle berührt werden, es ist jedoch ratsam, sich diesem Punkt vorsichtig durch kurzes Tasten an zu nähern. Die heißeste Stelle kann auch Minuten nach dem Heizen noch mehrere hundert Grad Celsius haben.

4.6 Thermitreaktion

Die Thermitreaktion ist eine stark exotherme Reaktion, bei der Temperaturen von mehreren tausend Grad erreicht werden können, genug um sich durch Stahlplatten zu schmelzen. Im Gleisbau wird Thermit beispielsweise verwendet, um Schienenabschnitte zu verbinden.

Materialien und Geräte:

- Eisen(III)oxid (Fe_2O_3)
- Aluminiumpulver (Al)
- Magnesiumband
- Laborgasbrenner (Butan, Propan)

Durchführung und Beobachtungen:

Um dieses Experiment durchzuführen, wird ein geeigneter Platz im Freien benötigt, der von sämtlichen brandgefährdeten oder entzündlichen Gegenständen und Substanzen zu räumen ist. Das Gemisch aus Eisenoxid und Aluminiumpulver sollte in einem Gefäß vorbereitet werden, das im Zuge der Durchführung, schadstofffrei schmelzen oder verbrennen kann. Um das Gemisch herzustellen, ist Eisenoxid mit Aluminiumpulver im Mischungsverhältnis von 2,96 zu 1 gut zu vermengen (2,96 Anteile Eisenoxid und 1 Teil Aluminiumpulver). Eine gute Dosis für eine anschauliche Reaktion ohne zu großen vertikalen Wirkungsbereich ist 50 g Eisenoxid und 17 g Aluminiumpulver. Das Gemisch kann bei Einhaltung des Mischungsverhältnisses nur mit sehr hoher Aktivierungsenergie gezündet werden. Die Zündung über ein Magnesiumband ist ideal und ermöglicht ein Verlassen des Gefahrenbereichs vor der Zündung. Nach der Zündung des Gemisches ist unverzüglich eine starke Reaktion zu beobachten. Das Eisenoxid reagiert mit dem Aluminiumpulver und erzeugt eine Fontäne aus oxidierendem Aluminium. Der entstehende Funkenflug sowie die Rauchentwicklung und Flammenbildung sind stark von dem Behältermaterial des Gemisches abhängig. Das Gemisch verbrennt schnell und vollständig, sollten also nach der Reaktion noch Flammen und starke Rauchentwicklung auftreten, so sind diese auf das Behältermaterial zurück zu führen. Nach dem Abklingen der

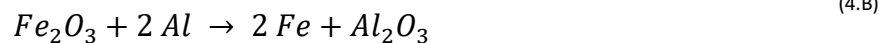


Abbildung 19: Thermitreaktion; eigenes Bild

Reaktion kann erstarrtes elementares Eisen, ein Beiprodukt der Thermitreaktion, aus den Überresten entnommen werden.

Erklärung:

Die Thermitreaktion läuft wie folgt ab:



Mit Hilfe dieser Reaktionsgleichung kann der Ablauf beschrieben und das Mischungsverhältnis der Chemikalien mit Hilfe der molaren Massen berechnet werden.

$$M(Fe_2O_3) = M(Fe_2) + M(O_3) = 2 \cdot 55,85 \frac{g}{mol} + 3 \cdot 15,99 \frac{g}{mol} \quad (4.C)$$

$$M(Al_2) = 2 \cdot 26,98 \frac{g}{mol} ; \frac{M(Fe_2O_3)}{M(Al_2)} = 2,96 \quad (4.D)$$

Durch die hohe Temperatur bei der Reaktion schmilzt das entstehende Eisen und sinkt durch die hohe Dichte auf den Boden ab. Das Aluminium wird oxidiert. Bei der Oxidation werden Temperaturen über 2000 Grad Celsius erreicht.

Besondere Sicherheitshinweise:

Das Experiment darf niemals in geschlossenen Räumen durchgeführt werden. Das Eisenoxid-Aluminium-Gemisch darf bei der Reaktion nie mit gefrorenen Objekten oder Substanzen in Berührung kommen, da sonst mit unkontrollierten Explosionen zu rechnen ist. Der Untergrund ist thermisch so gut wie möglich abzusiegeln (z.B: mit Sand). Es ist immer ein Sicherheitsabstand von mindestens zwei Metern einzuhalten. Es muss unbedingt mit Handschuhen und Schutzbrille gearbeitet werden. Das bei der Reaktion entstehende Eisen bleibt noch lange nach dem Abklingen der Reaktion heiß.

Video:



[Link zum Video](#)

4.7 Das Flammensieb (Davy-Lampe)

Die wärmeleitenden Eigenschaften von Metallen können genutzt werden, um die Ausbreitung von Flammen zu unterbinden. Diesen Effekt machte man sich im Bergbau zu Nutze, um gefährlichen Explosionen von Grubengasen vorzubeugen.

Materialien und Geräte:

- Feinmaschiges Metallgitter
- Feuerzeug

Durchführung und Beobachtungen:

Das Metallgitter wird entweder mit einer Zange oder einer geeigneten Vorrichtung fixiert. Anschließend wird das Feuerzeug von unten an das Gitter geführt und es kann beobachtet werden, wie die Flammen das Gitter nicht passieren. Um die Funktionsweise einer Grubenlampe nachzustellen, muss das Feuerzeug ganz an das Gitter gebracht werden, zusätzlich soll nicht entzündetes Gas ausströmen und das Gitter passieren. Nun kann das Gas mit einer zweiten Zündquelle an der oberen Seite des Gitters gezündet werden. Die Flamme folgt den Bewegungen des Feuerzeugs an der Unterseite, tritt aber nie selbst unter das Gitter.

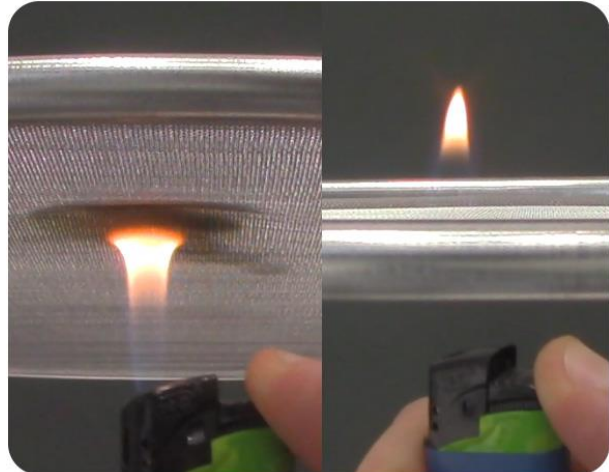


Abbildung 20: Prinzip der Davy Grubenlampe; eigenes Bild

Erklärung:

Die gute Wärmeleitung des Metalls verhindert die Ausbreitung der Flammen auf der dem Feuerzeug gegenüberliegenden Seite des Gitters. Das Gas kann das Gitter problemlos passieren. Wird es entzündet, so führt die gute Wärmeleitung des Gittermaterials dazu, dass die Zündtemperatur nicht mehr erreicht werden kann. Die Folge ist ein Erlöschen der Flamme.

Video:



[Link zum Video](#)

4.8 Spraydosen-Flammenwerfer

Mit Spraydosen, die brennbare Substanzen enthalten, welche nach dem Versprühen ein Aerosol bilden und einem Feuerzeug lässt sich ein einfacher Flammenwerfer demonstrieren.

Materialien und Geräte:

- Spraydose
(brennbare Substanz
bzw. Treibgas)
- Feuerzeug



Abbildung 21: Aerosol-Flammenwerfer; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Die Spraydose wird so ausgerichtet, dass sich keine Person oder kein Objekt im unmittelbaren Wirkungsbereich von einigen Metern befindet. Dann kann das ausströmende Gas mit einem Feuerzeug gezündet werden.

Erklärung:

Viele Spraydosen enthalten entweder brennbare Kernsubstanzen oder Treibgase wie Isobutan oder Propan. Diese Gase mischen die Kernsubstanz nach dem Verlassen der Dose mit der Umgebungsluft und verflüchtigen sich selbst. Wird allerdings direkt vor dem Ventil der Dose eine Zündquelle platziert, so zünden entweder die Treibgase vor der Verflüchtigung oder die brennbaren Aerosole. Die feinen Partikel im Aerosol sind auf Grund ihrer geringen Oberfläche leicht entzündlich.

Besondere Sicherheitshinweise:

Es ist wichtig Spraydosen zu verwenden, deren Treibgas die Kernsubstanz zu einem Aerosol zerstäubt, um keine brennenden Substanzen zurück zu lassen.

Video:



[Link zum Video](#)

4.9 Der fliegende Teebeutel

Ein Experiment, welches das archimedische Prinzip so einfach, wie auch spektakulär demonstriert.

Materialien und Geräte:

- Teebeutel
- Schere
- Hitzebeständige Oberfläche
- Zündhölzer oder Feuerzeug



Abbildung 22: Fliegender Teebeutel; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Der oberste Teil des Teebeutels, dort wo der kleine Faden meist befestigt wird, wird abgetrennt und der Beutelinhalt wird entfernt. Der Teebeutel kann nun so gefaltet werden, dass ein stehendes Röhrchen entsteht. Oft ist es, um das Gelingen des Experiments zu garantieren, ratsam, einen zweiten präparierten Teebeutel im anderen zu platzieren. Das Röhrchen sollte stabil stehen. Ist das der Fall, kann es an der oberen Kante entzündet werden. Sofort beginnt die Oxidationsreaktion und der Teebeutel hebt, kurz bevor die Flammen das Papier vollkommen verkohlen, ab.

Erklärung:

Der plötzliche starke Auftrieb des übrigen Teebeutels kann mit Hilfe des archimedischen Prinzips erklärt werden. Die umgebende Luft wird durch die Flammen erhitzt und steigt auf, weil ihre Dichte abnimmt. Sie ist also leichter als die umgebende kältere Luft. Ist der Teebeutel fast vollkommen verbrannt, so reicht die geringe Menge an aufsteigender Luft aus, um den Rest des Beutels mitzuziehen. Erlöschen die Flammen, so sinken die zu Asche gewordenen Reste zu Boden.

Video:



[Link zum Video](#)

4.10 Brennendes Handgel

Alkoholhaltige Desinfektionsgels können leicht entzündet werden und brennen mit einer bläulichen Flamme. Diese Flammen können, während der Alkohol oxidiert, auf der Handfläche oder den Fingern kurzzeitig gehalten werden.

Materialien und Geräte:

- Handdesinfektionsgel
- Feuerzeug
- Feuerfeste Unterlage
- Wasser



Abbildung 23: Brennendes Handgel; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Das Handgel wird auf eine feuerfeste Unterlage aufgetragen und angezündet. Mit leicht angefeuchteten Händen kann das brennende Gel verstrichen und wenige Sekunden aufgenommen werden.

Erklärung:

Handdesinfektionsgels enthalten meist Alkohol, um Fette zu lösen und Bakterien zu töten und einen gewissen Anteil an Wasser, um die gewünschte Viskosität zu gewährleisten. Der Alkohol verdunstet und das entstehende Gasmisch verbrennt. Der Wasseranteil und die angefeuchtete Hand schützen die Haut kurzzeitig vor Verbrennungen.

Besondere Sicherheitshinweise:

Wird das brennende Material aufgenommen, so wird die Hand schnell sehr warm. Deswegen sollte immer die Möglichkeit bestehen, die Flammen gefahrlos an einer feuerfesten Oberfläche zu ersticken.

Video:



[Link zum Video](#)

4.11 Rekonstruktion von Starlite

Starlite ist eine genauso rätselhafte wie extrem feuerfeste Substanz. Der Erfinder Maurice Ward hat das Geheimnis seines Starlites nie der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Hier soll ein kleiner Beitrag zur Entmystifizierung der Zusammensetzung des vermeintlichen Wunderproduktes geleistet werden.

Materialien und Geräte:

- Mais- oder Kartoffelstärke
- Backpulver (NaHCO_3)
- Weißer Bastelkleber oder Holzleim
- Rührschüssel



Abbildung 24: Starlite; eigenes Bild

Herstellung:

Ein handelsübliches Päckchen Backpulver (16 g) wird mit 160 g Mais- oder Kartoffelstärke gut vermengt. Werden andere Grundmengen verwendet, sollte sich der Backpulveranteil auf 10% belaufen. Das Gemisch wird anschließend mit Holzleim aufgegossen und vermischt, bis eine Masse entsteht, die große Ähnlichkeit zu Knetmasse oder Teig besitzt. Anfangs sollte mit einem Löffel gerührt werden, ist die Sättigung an Leim hoch genug, kann mit den Händen geknetet werden. Bis zur Fertigstellung wird etwa zweimal so viel Leim gebraucht wie Stärke verwendet wurde. Die Masse hat die richtige Konsistenz, wenn sie überhaupt nicht mehr klebt und sich beim Ausrollen keine Risse bilden. Vor dem Einsatz sollte die Starlite-nachbildung, je nach Ausrolldicke mehrere Stunden trocknen.

Durchführung und Beobachtungen:

Das getrocknete Produkt kann auf diverse Oberflächen oder Objekte aufgebracht werden und mit Hilfe eines Gasbrenners auf Feuerfestigkeit getestet werden. Die Seite, die in Kontakt mit der Flamme steht, wird schnell verkohlen, aber nicht brennen. Die verkohlte Schicht wächst unter der Flamme wenige Millimeter und hebt sich vom Rest der Substanz ab. Die Innenseite wird warm, sollte aber bei korrekter Herstellung nie auch nur einen Bruchteil der

Flammentemperatur erreichen. Bei dem hier durchgeführten Demonstrationsexperiment werden zwei Eier mit einem Küchengasbrenner erhitzt, eines davon wird einseitig mit Starlite isoliert. Das nicht präparierte Ei wird bei Kontakt mit der Flamme sofort verkohlen und aufplatzen. Das Ei mit der Schutzschicht aus Starlite sollte beliebig lang den Flammen in einem Brennvorgang widerstehen. Dieser Versuchsaufbau lässt sich mit verschiedensten Materialien wiederholen, so zum Beispiel auch mit Wachs.

Erklärung:

Wird das Material großer Hitze ausgesetzt, beginnt die Stärke zu verkohlen. Es entsteht eine Schicht aus Kohlenstoff auf der Oberfläche des Materials, da nicht genug Sauerstoff für eine komplette Verbrennung vorhanden ist. Beginnt die Stärke zu verkohlen, wird durch das Natriumhydrogencarbonat ($NaHCO_3$) im Backpulver der Mischung Kohlenstoffdioxid frei, welches den Sauerstoff verdrängt und den Kohlenstoff nach außen, also der Flamme entgegen, hebt. Kohlenstoff selbst ist in fester Form das hitzebeständigste Material überhaupt. vgl. [(20), Kapitel 4, S. 4-8]

Das verkohlte Starlite kann schon Sekunden nach Einwirkung der Flammen mit bloßer Hand berührt werden, da der Kohlenstoffschaum, der sich gebildet hat, auf Grund der Schwarzkörperstrahlung die Wärme ebenso schnell emittiert wie absorbiert.

Besondere Sicherheitshinweise:

Es ist für ausreichende Belüftung zu sorgen. Einmal verwendetes Starlite weist wesentlich schlechtere thermische Isolationseigenschaften auf, es sollte daher für jeden Brennvorgang eine neue Probe verwendet werden.

Video:



[Link zum Video](#)

4.12 Die Pharaoschlange

Mit Backpulver und Zucker kann eine Mischung erzeugt werden, aus der sich bei Erhitzung eine Schlange aus Kohlenstoffschaum erhebt.

Materialien und Geräte:

- Zucker
- Backpulver (NaHCO_3)
- Sand und feuerfeste Unterlage
- Brennspritus
- Feuerzeug



Abbildung 25: Die Pharaoschlange; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Um die Mischung herzustellen wird Zucker etwa im Verhältnis 5:1 mit Backpulver vermengt. Aus dem Sand wird auf einer feuerfesten Unterlage ein kleiner Hügel geformt und mit Brennspritus getränkt. Alternativ kann der Sand auch in ein Glasbehältnis gefüllt werden. Der Sand dient der thermischen Isolation. Ist der Hügel geformt, so kann er leicht eingedrückt werden, um eine Mulde zu bilden. In diese Mulde wird das Gemisch aus Zucker und Backpulver eingefüllt und der getränkte Sand wird entzündet. Mit relativ moderater Geschwindigkeit beginnt eine Säule aus dem verkohlten Zucker zu wachsen. Der Schaum ist sehr leicht und porös. Statt Zucker und Backpulver können auch zuckerhaltige EMSER Pastillen® verwendet werden, da diese auch Natriumhydrogencarbonat enthalten.

Erklärung:

Der Zucker verkohlt auf Grund der hohen Hitze die durch den verbrennenden Brennspritus entsteht. Das Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3) des Backpulvers setzt bei der Verbrennung Kohlenstoffdioxid (CO_2) frei, welches Sauerstoff verdrängt und durch die Hitze aufsteigt. Beim Aufsteigen wird die äußerste Schicht des verkohlten Zuckers angehoben und die Schlange beginnt zu wachsen. Je nach Menge des Gemisches fallen die Schlangen größer oder kleiner aus, weil mehr Zucker zur Verbrennung zur Verfügung steht.

Besondere Sicherheitshinweise:

Das Experiment ist bevorzugt draußen oder in stark belüfteten Räumen durchzuführen, da die entstehenden Dämpfe Rußpartikel enthalten können und die Reaktion unter Umständen lange anhält.

Video:



[Link zum Video](#)

4.13 Thermische Expansion eines Metallstabes

Um die thermische Längenexpansion eines Stabes möglichst deutlich darzustellen, gibt es ein einfaches Experiment, das mit leicht zugänglichen Materialien vorgeführt werden kann.

Materialien und Geräte:

- Metallstab
- Feuerzeug
- Papierzeiger
- Nadel
- Zwei Flaschen oder hohe Gläser



Abbildung 26: Längenexpansion eines Metallstabes; eigenes Bild; Material zur Verfügung gestellt von der TU Graz

Durchführung und Beobachtungen:

Vorbereitend muss ein Pfeil aus Papier ausgeschnitten werden, durch dessen Schwerpunkt normal zur Oberfläche eine Nadel gesteckt wird. Die Metallstange wird einseitig abgewinkelt, so dass die Möglichkeit besteht, sie einzuhängen. Für das Experiment selbst werden zwei Flaschen mit einem Abstand der ca. der Länge der Stange entspricht, neben einander auf einem Tisch platziert. Auf einem der beiden Flaschenhälse wird die Nadel mit dem Papierzeiger platziert. Die Stange wird dann mit dem abgewinkelten Ende in dem anderen Flaschenhals verankert und über die Nadel gelegt. Nun kann die Stange in der Mitte mit einem Feuerzeug erhitzt werden. Sofort kann beobachtet werden, wie sich der Papierzeiger zu drehen beginnt.

Erklärung:

Die thermische Expansion von Festkörpern ist auf die Wechselwirkung ihrer inneren Atome zurückzuführen. Die Atome befinden sich nicht in Ruhe, sondern schwingen, auf Grund der Wechselwirkungen mit ihren Nachbaratomen um ihre Ruhelage. Wird Energie in Form von Wärme zugeführt, so nehmen die Atome diese als Schwingungsenergie auf und ihre Schwingungsamplitude steigt. Kinetische und potentielle Energie der Atome nimmt zu und die

Abweichung von der Ruhelage wird größer. Das heißt also, dass der Abstand der Atome zunimmt. Damit ist die Expansion erklärt. vgl. [(10), S. 280f]

Der Zeiger aus Papier ist auf einer Nadel befestigt, die durch die Reibung mit dem expandierenden Metallstab in Drehung versetzt wird. Die Auslenkung des Zeigers ist proportional zur thermischen Längenexpansion des Metallstabes mit einem ungefähren Übersetzungsverhältnis von 1:60. Wird der Metallstab nicht einseitig fixiert, so ist die Auslenkung des Zeigers geringer.

Video:



[Link zum Video](#)

4.14 Thermische Volumexpansion

Um zu demonstrieren wie sich selbst massive metallische Objekte ausdehnen, wird in diesem Experiment eine Stahlkugel so stark erhitzt, dass sie nicht mehr durch ein Loch passt, durch welches sie im kalten Zustand leicht hindurchpasst.

Materialien und Geräte:

- Stahlkugel mit Kette
- Stativmaterial
- Laborgasbrenner
- Handschuhe
- Stahlplatte mit Loch
(Durchmesser der Kugel)

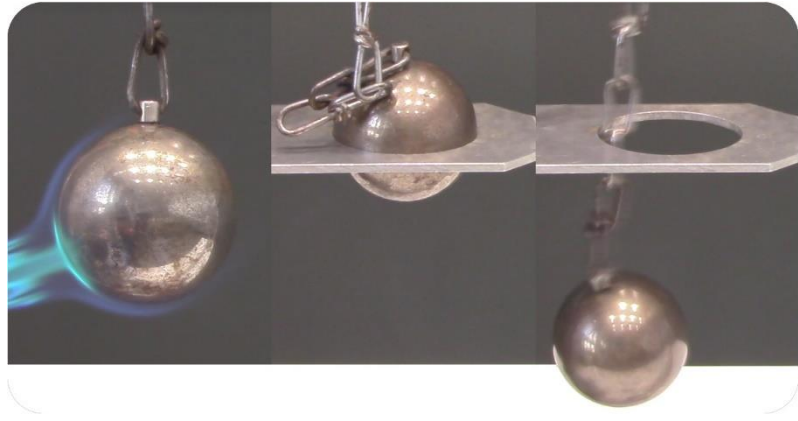


Abbildung 27: Thermische Expansion einer Stahlkugel; eigenes Bild; Material zur Verfügung gestellt von der TU Graz

Durchführung und Beobachtungen:

Das Stativ wird so eingestellt, dass die Kugel bei senkrechtem freiem Fall genau durch das Loch in der Stahlplatte passt. Die Kette der Kugel wird solange um das obere Ende des vertikalen Stativstabes über der Gabelung gewickelt, bis die Kugel freihängend über der Stahlplatte leicht zu erhitzen ist. Beim Erhitzen der Kugel ist darauf zu achten, nur die Kugel zu erhitzen. Wird die Platte mit erhitzt, so verfälscht sich das Ergebnis und es dauert länger bis die Kugel durchfällt. Ist die Kugel erhitzt, kann die Kette gelöst und die Kugel in das Loch gelegt werden, durch welches sie zu diesem Zeitpunkt nicht mehr durchpassen sollte. Erfährt die Kugel keine Energiezufuhr mehr und ist genügend lange abgekühlt, so wird sie durch das Loch sinken und von der Kette aufgefangen werden.

Erklärung:

Die thermische Expansion von Festkörpern ist auf die Wechselwirkung ihrer inneren Atome zurückzuführen. Die Atome befinden sich nicht in Ruhe sondern schwingen auf Grund der Wechselwirkungen mit ihren Nachbaratomen um ihre Ruhelage. Wird Energie in Form von

Wärme zugeführt, so nehmen die Atome diese als Schwingungsenergie auf und ihre Schwingungsamplitude steigt. Kinetische und potentielle Energie der Atome nimmt zu und die Abweichung von der Ruhelage wird größer. Das heißt also, dass der Abstand der Atome zunimmt, und die Expansion ist erklärt. vgl. [(10), S. 280f]

Wird die Metallplatte mit dem Loch ebenfalls erhitzt, so dehnt diese sich ebenso aus. Das hat zur Folge, dass das Loch schrumpft und die Kugel schon wesentlich früher steckenbleibt. Das Phänomen ist dasselbe, aber der Aufbau des Experiments sollte sich auf die Stahlkugel beschränken.

Besondere Sicherheitshinweise:

Die Stahlkugel bleibt auch lange nachdem sie durch das Loch gefallen ist, viel zu heiß um sie mit bloßen Händen anzugreifen. Selbst kurzes Abschrecken hilft wenig. Das Stativmaterial sollte mit der Kugel mindestens eine Stunde abkühlen.

Video:



[Link zum Video](#)

4.15 Das singende Rohr

Ein Rohr, das kurz im Inneren mit einer Brennerflamme erhitzt wurde, beginnt schlagartig einen sehr charakteristischen Ton abzugeben. Hier macht man sich eine interferierende Luftsäule zu Nutze.

Materialien und Geräte:

- Stahlrohr
- dichtes Metallgitter
- Laborgasbrenner
- Handschuhe

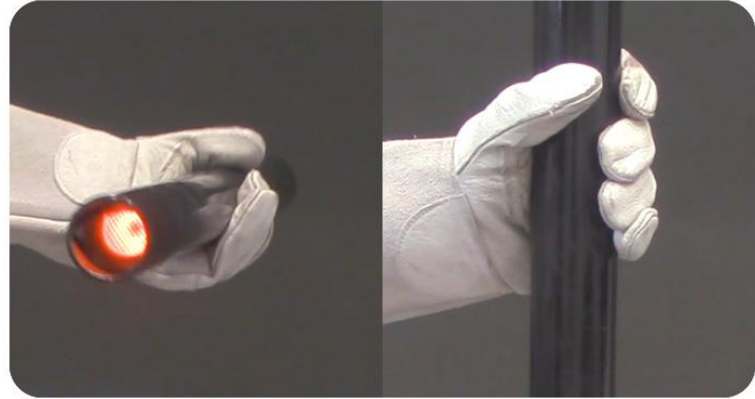


Abbildung 28: Das singende Rohr; eigenes Bild; Stahlrohr zur Verfügung gestellt von Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher

Durchführung und Beobachtungen:

Das Gitter wird im unteren Viertel etwa zehn Zentimeter tief im Rohr platziert und fixiert. Anschließend kann das Metallrohr für die Versuchsdurchführung wegen der schlechten wärmeleitenden Eigenschaften von Stahl am oberen Ende sogar ohne Handschuhe gehalten werden. Mit einem Laborgasbrenner wird nun das Gitter im vertikal gehaltenen Rohr einige Sekunden erhitzt. Schon Augenblicke nach dem Erhitzen wird ein überraschend lauter Ton hörbar. Wird das Rohr in die Horizontale gedreht, verklingt der Ton.

Erklärung:

Durch das stark erhitzte Gitter wird auch die Umgebungsluft im Rohr erwärmt, ihre Dichte nimmt ab und sie steigt auf. Dies hat zur Folge, dass im Rohr ein Unterdruck entsteht, der damit ausgeglichen wird, dass Luft von unten in das Rohr gesaugt wird. Dieser Ablauf ist auch als Kamineffekt bekannt.

Die aufsteigende schwingende Luftsäule erzeugt selbst und durch Interferenz mit den Seitenwänden des Rohrs einen Ton. Das Rohr bildet einen Resonanzkörper. Abhängig von der Wellenlänge der Longitudinalwelle der Luftteilchen, der Geschwindigkeit der Luftsäule und der Länge des Stahlrohrs kann eine stehende Welle entstehen. Dies würde den

Resonanzfrequenzen des Rohrs entsprechen, also dem Schwingvorgang mit maximaler Amplitude. vgl. [(21), S. 396f]

Besondere Sicherheitshinweise:

Nach einigen Durchgängen sollten Handschuhe angezogen werden, da sich der Stahl auch trotz der schlechten wärmeleitenden Eigenschaften nach einiger Zeit stark erhitzt. Dem Rohr muss nach Gebrauch ausreichend Zeit zum Abkühlen gegeben werden.

Video:



[Link zum Video](#)

4.16 Fettbrand

Im kleinen Maßstab lässt sich die enorme Gefahr veranschaulichen, die entsteht, wenn ein Fettbrand mit Wasser gelöscht wird.

Materialien und Geräte:

- Stativmaterial
- kleines Metallbehältnis
- Wachs oder Öl
- Gesichtsschutz
- Handschuhe
- Laborgasbrenner

Durchführung und Beobachtungen:

Sichtschutz und Handschuhe müssen während des gesamten Experiments getragen werden und dürfen nicht abgelegt werden.

Das Metallbehältnis wird mit wenigen Milliliter Öl oder dem Wachs eines Viertel Teelichts gefüllt. Auf dem Stativ wird ein Metallgitter befestigt, auf dem das Teelicht platziert werden kann. Von unten wird das Gitter und damit auch das Behältnis, mit Hilfe des Gasbrenners erhitzt. Nach dem Erhitzen wird der Brenner abgeschaltet und aus dem Gefahrenbereich entfernt. Mit Hilfe einer Spritzflasche kann nun das Wasser aus sicherer Entfernung einige Schritte entfernt vom Stativ in das Behältnis gefüllt werden. Sofort beim Auftreffen des Wassers wird ein Feuerball entstehen, der unter Umständen mehrere Meter hoch werden kann. Heiße Partikel werden mit den Flammen mitgerissen und könnten die unmittelbare Umgebung gefährden.

Idee und Aufbau: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher

Erklärung:



Abbildung 29: Fettbrand mit Wasser löschen; eigenes Bild; Material zur Verfügung gestellt von der TU Graz

Die Idee, Wasser als Löschmittel ein zu setzen, ist eine ganz einfache. Es wird einerseits versucht, dem brennenden Material Sauerstoff zu entziehen und andererseits durch Kühlung den Flammpunkt der brennenden Substanz zu unterschreiten. Versucht man Öl mit Wasser zu löschen, wird das Wasser auf Grund der höheren Dichte immer unter das Öl sickern. Dabei verdampft das Wasser sofort und durch die Volumsexpansion des Wasserdampfs werden kleine Ölpartikel in der Umgebungsluft zerstreut. Die kleinen Öltröpfchen haben jetzt ein sehr geringes Volumen und eine vergleichsweise große Oberfläche. Sie können nun, auf Grund ihrer erhöhten Temperatur und durch ausreichende Sauerstoffzufuhr in der Luft, verbrennen. Die brennenden Ölpartikel werden in der unmittelbaren Umgebung verteilt und verbrennen meist komplett. Es kann jedoch vorkommen, dass ausreichend große Tröpfchen nicht vollständig verbrennen und so eine zusätzliche Gefahr darstellen.

Besondere Sicherheitshinweise:

Öl darf niemals mit Wasser gelöscht werden. Öl-brände sollten erstickt werden. Es ist immer ein Gesichtsschutz und ausreichend Körperschutz zu tragen. Die empfohlene Dosis an Öl oder Wachs sollte nicht überschritten werden. Die Beobachter müssen immer einen Sicherheitsabstand von mehreren Metern einhalten. Idealerweise ist das Experiment draußen durchzuführen.

Video:



[Link zum Video](#)

4.17 Schwarzes Feuer

Mit Hilfe einer Natriumdampfampe und Kochsalz lässt sich die Absorption von elektromagnetischen Wellen an einer Flamme demonstrieren. Damit ist es möglich, Feuer als Lichtquelle einen Schatten werfen zu lassen.

Materialien und Geräte:

- Natriumdampfampe
- Stativmaterial
- Brennspritus
- Kochsalz
- Feuerzeug
- Metallbehältnis

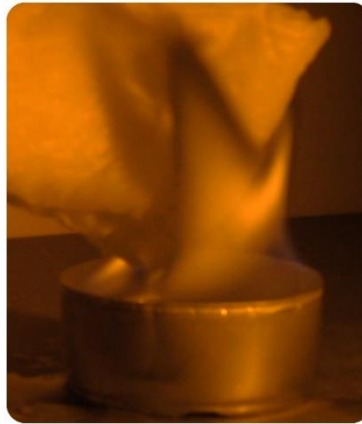


Abbildung 30: Flamme umschließt ein in Kochsalz getränktes Tuch im Licht einer Natriumdampfampe; eigenes Bild; Natriumdampfampe zur Verfügung gestellt von der TU Graz

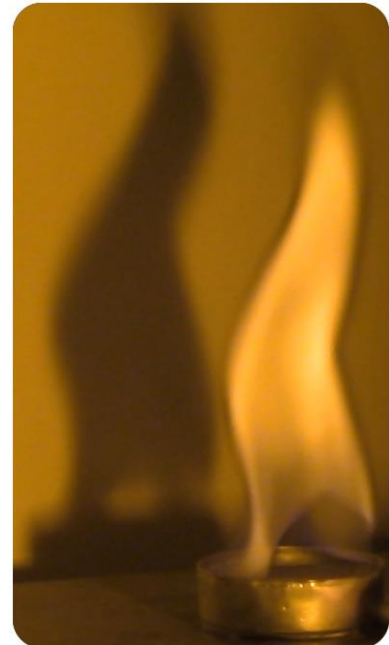


Abbildung 31: Schatten einer Flamme im monochromatischen Licht einer Natriumdampfampe; eigenes Bild; Natriumdampfampe zur Verfügung gestellt von der TU Graz

Durchführung und Beobachtungen:

Die Natriumdampfampe wird so platziert, dass sich ein kleines Behältnis mit dem Brennspritus im direkten Strahlengang der monochromatischen Strahlung befindet. Alle anderen Lichtquellen müssen abgeschaltet werden. Das Kochsalz wird im Behältnis mit dem Spiritus gemischt, bis es sich in geringen Mengen zu lösen beginnt. Wird der Brennspritus entzündet, so ist klar ein Flammenschatten zu erkennen. Ebenso flackert die Flamme manchmal schwarz auf. Zusätzlich kann ein Stück Küchenrolle in Salzwasser getränkt und in die Flamme geführt werden. Ein stärkeres schwarzes Aufflackern rund um das getränkte Papier sollte erkennbar sein.

Erklärung:

Feuer hat als Quelle elektromagnetischer Strahlung im sichtbaren Bereich, selbst keinen Schatten. Es tritt weder Reflexion noch Absorption von Licht auf. Um also Feuer einen Schatten werfen zu lassen, muss es eine dieser Eigenschaften annehmen. In diesem Fall wird Kochsalz ($NaCl$) mit Brennspritus vermischt, um einen Brennstoff zu erzeugen, der Natrium

enthält. Wird die Flamme nun mit monochromatischem Licht, das durch die Ionisation und Rekombination von Natriumgas in der Lampe entsteht, bestrahlt, so ist sofort ein deutlicher Schatten zu sehen. Das Feuer hat durch die Natriumatome, die sich im Brennstoff befinden, die Möglichkeit, elektromagnetische Strahlung genau der Wellenlänge zu absorbieren, die durch die Ionisation von Natriumgas in der Lampe ausgesendet wird. Das getränkte Tuch ermöglicht nur eine andere Art das Natrium zur Verfügung zu stellen.

Video:



[Link zum Video](#)

4.18 Gusseisenstab sprengen

Durch thermische Expansion und anschließende Kontraktion ist es möglich, einen Splint aus Gusseisen zu sprengen. Die hohe mechanische Belastung bringt das spröde Material zu Bruch.

Materialien und Geräte:

- Spannvorrichtung aus Stahl
- Gusseisenstab
- Laborgasbrenner

Durchführung und Beobachtungen:

Der Gusseisenstab wird in die Spannvorrichtung eingesetzt und festgespannt. Der Spannstützen sollte

gleichmäßig auf der vollen Länge erhitzt und immer wieder während des Heizvorgangs über die Verstellechraube nachgezogen werden. Nach einigen Minuten sollte der Stützen sich so weit ausgedehnt haben, dass er beim Kontrahieren den Gusseisenstab brechen kann. Ist der Brenner abgeschaltet, dauert es abhängig vom verwendeten Stahl noch einige Augenblicke, bis die Kontraktion so weit fortgeschritten ist, dass der Stab bricht.

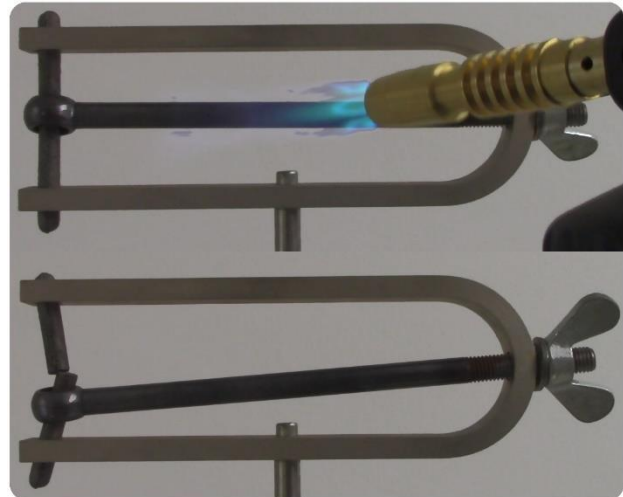


Abbildung 32: Sprengen eines Gusseisensplints durch thermische Kontraktion; eigenes Bild; Material zur Verfügung gestellt von der TU Graz

Erklärung:

Beim Erhitzen expandiert der Spannstützen aus Stahl. Durch die Verstellechraube kann er wieder zurück in Richtung Ausgangsposition geschraubt werden. Nach der Kontraktion nimmt er so also eine Position ein, die wesentlich von der Ausgangsposition abweicht und eine große Biegebelastung auf den Gusseisenstab ausübt. Der Stab kann auf Grund seiner Struktur dieser Biegebelastung nicht lange widerstehen, kann sich aber auch nicht selbst biegen und bricht.

Video:



[Link zum Video](#)

4.19 Die Kerze im Glas

Mit Hilfe eines kleinen Glases, eines Teelichts und eines nassen Stücks Küchenrolle lässt sich eine erstaunliche Last fixieren und anschließend komfortabel heben.

Materialien und Geräte:

- Teelicht
- Glasplatte oder Teller
- kleines Glas
- Küchenpapier
- Feuerzeug

Durchführung und Beobachtungen:

Das Küchenpapier wird nass gemacht, mehrmals gefaltet und auf einem beliebigen deutlich schwereren Objekt mit flacher glatter Oberfläche platziert (Teller oder Glasplatten eignen sich gut). Auf dem Stück Küchenpapier wird das Teelicht positioniert und entzündet. Anschließend wird ein Glas langsam über das brennende Teelicht gestülpt und leicht angedrückt. Das Glas sollte sich in seiner Gesamtheit auf dem Küchenpapier befinden. Nach wenigen Sekunden wird die Kerze ausgehen und das Glas leicht beschlagen. Ab diesem Zeitpunkt sollte sich das Objekt nur über ein Anheben des Glases problemlos aufheben und bewegen lassen.



Abbildung 33: Die Kerze im Glas; eigenes Bild

Erklärung:

Die Luft über dem nassen Papier erwärmt sich durch das brennende Teelicht und steigt auf. Wird ein Glas von oben über das Teelicht gestülpt, so entweicht die warme Luft weiterhin kurz über das nasse Küchenpapier. Gleichzeitig wird der Kerze durch das Glas die Sauerstoffzufuhr

abgeschnitten und die Kerze erlischt. Dadurch kühlt die Luft im Inneren des Glases ab und es entsteht ein Unterdruck. Man kann beobachten wie der Luftdruck von außen Wasser aus der Küchenrolle in das Innere des Glases drückt. Das Glas beschlägt, weil geringe Mengen Wasserdampf kurz vor dem Erlöschen der Kerze am Glas kondensieren. Durch den höheren Druck außerhalb des Glases wird das zu hebende Objekt auf das Glas gepresst und lässt sich deswegen nur über ein Anheben des Glases, aufheben. Mehr als ein Hebevorgang wird nicht möglich sein, da sich die Luft relativ schnell ihren Weg durch die improvisierte Dichtung bahnt.

Video:



[Link zum Video](#)

4.20 Feuerstahl

Der Einsatz eines Feuerstahls ist eine einfache und effektive Methode, um mit dem richtigen Zunder, innerhalb von Sekunden Feuer zu machen.

Materialien und Geräte:

- Feuerstahl
- Wolle oder Watte

Durchführung und Beobachtungen:

Das Experiment sollte im Freien durchgeführt werden. Der Zunder sollte

relativ fein und kompakt sein, Watte oder Wolle eignen sich hierfür gut. Um Funken aus dem Stahl zu schlagen, wird ein abgekantetes Metallstück am Feuerstahl entlang gezogen. Dabei sollten, wenn genug Druck auf den Stahl ausgeübt wird, Funken entstehen. Unter diesen Funken entzündet sich der Zunder meist sofort.



Abbildung 34: Funkenschlag durch Feuerstahl; eigenes Bild

Erklärung:

Feuerstahl hat einen hohen Kohlenstoffanteil und bildet meist eine Legierung mit diversen seltenen Erden. vgl. [(22)]

Durch die mechanische Belastung beim Reibvorgang wird Material von der Oberfläche des Feuerstahls abgetragen und entzündet. Eine Entzündung kann stattfinden, weil das abgetragene Material ein geringes Volumen und eine im Vergleich dazu, große Oberfläche besitzt. Auf Grund der Zusammensetzung des Materials verglühen diese Metallspäne mit hoher Temperatur und können bei Kontakt geeignetes Zundermaterial entzünden.

Video:



[Link zum Video](#)

4.21 Herstellung von Holzkohle

Holzkohle kann durch eine kontrollierte Verkohlung von Holz mit einfachsten Mitteln, hergestellt werden.

Materialien und Geräte :

- Metalldose (verschießbar)
- Geeignete Hitzequelle (Holzofen, Holzfeuer, Propanflamme)
- Handschuhe
- Holz
- Zange
- Bohrer



Abbildung 35: Herstellung von Holzkohle; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

In den Deckel der Metalldose werden drei bis fünf Löcher gebohrt, um ein Entweichen der Gase zu ermöglichen. Anschließend wird die Dose mit Holzstücken gefüllt und verschlossen. Die Dose muss so lange der Hitzequelle ausgesetzt werden, bis keine Gase mehr entweichen. Die Dose muss so lange der Hitzequelle ausgesetzt werden, bis keine Gase mehr entweichen. Mit der Art der Hitzebehandlung variiert auch die Dauer des Experiments. Mit einem kontrollierten Holzfeuer und fortlaufendem Nachlegen von Brennstoff beläuft sich die Zeit bei einem Dosenvolumen von zwei Litern etwa auf 25 Minuten. Entweicht kein Gas mehr, so kann die Dose aus dem Feuer genommen und geöffnet werden. Das Holz im Inneren sollte mittlererweile vollständig verkohlt worden sein.

Erklärung:

Eine Verkohlung tritt immer ein, wenn nicht genügend Sauerstoff für eine vollständige Verbrennung vorhanden ist. Das wird hier, über die Minimierung der Sauerstoffzufuhr durch den gelochten Deckel erreicht. Viele Faktoren wie Temperatur, Holzart, Druck, Pyrolyseendtemperatur oder Geschwindigkeit der Verkohlung haben Auswirkungen auf die Güte der Holzkohle. Da dieses Experiment aber nur den Prozess generell demonstrieren soll

gibt es auch keine Messungen, genaue Anforderungen oder strikte Vorgaben der verwendeten Holzarten. vgl. [(23)]

Ein wichtiges Merkmal dieser Reaktion ist, dass es sich hier nicht um eine Oxidationsreaktion handelt, sondern um eine Pyrolysereaktion. Ein thermisch-chemischer Prozess, bei dem unter Sauerstoffausschluss und Hitze, Spaltungsreaktionen in Biomasse hervorgerufen werden. Die langsame Pyrolyse mit Temperaturen um ca. 400° C, lässt dabei den größten Anteil an fester Ausbeute zu. vgl. [(24), S. 1183f]

Durch die Pyrolyse erhöhen sich der Heizwert und die Energiedichte des Rohholzes. Holzkohle ist also ein energiereicherer Brennstoff als Rohholz. vgl. [(24), S. 647]

Besondere Sicherheitshinweise:

Das Experiment ist unbedingt draußen oder unter einem Abzug durchzuführen. Da in den meisten Fällen mit einem offenen Feuer gearbeitet wird, sind die entsprechenden Feuerschutzrichtlinien einzuhalten.

Video :



[Link zum Video](#)

4.22 Herstellung von Holzgas

Bei der Verkohlung von Holz entstehen Holzgase, die selbst brennbar sind und dadurch als Energiequelle verwendet werden können. Die Herstellung an sich ist relativ einfach.

Materialien und Geräte:

- Metalldose (verschießbar)
- Geeignete Hitzequelle (Holzofen, Holzfeuer, Propanflamme)
- Handschuhe
- Holz
- Bohrer



Abbildung 36: Herstellung von Holzgas in einem Holzfeuer; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Holz wird in eine Dose aus Metall gefüllt. In den Deckel der Dose werden ein paar Löcher gebohrt, um das Entweichen der Holzgase zu ermöglichen. In einem Lagerfeuer oder einer anderen Hitzequelle, wird die Dose erhitzt. Ab einer für die Verkohlung benötigten Temperatur beginnt ein weißer Qualm zu entweichen. Hierbei handelt es sich, zu großem Anteil um Wasserdampf. Ist vieles von dem Dampf entwichen, steigt ein wesentlich intensiverer und kompakterer, gräulich weißer Qualm aus der Dose auf. Dieser Qualm kann entzündet werden, da es sich schon um das Holzgas handelt.

Erklärung:

Wird Holz verkohlt, so sind Pyrolysereaktionen für eine stoffliche Veränderung des Holzes verantwortlich. Läuft die Pyrolysereaktion schnell, sprich mit hoher Temperatur ab, so ist der Anteil an Gasen größer als bei geringerer Temperatur. Das Holzgas setzt sich vorwiegend aus Kohlenmonoxid und Methan zusammen, es sind allerdings auch Spuren von Wasserstoff und Ethylen vorhanden. Bei einer Verkohlung mittels Lagerfeuer wird die Temperatur und damit auch die Ausprägtheit der Pyrolyse schwanken, das heißt, es ist nicht abzuschätzen wie viel

Holzgas tatsächlich entstehen wird und wieviel Material doch in Teer oder Kohle gebunden wird. vgl. [(24), S. 1197f] [(25), S. 1]

Der entweichende Qualm kann entzündet werden, weil jedes der Gase, aus denen Holzgas besteht mit Temperaturen, die bei der Verbrennung von Holz erreicht werden, zur Verbrennung gebracht werden kann. Entweicht kein Qualm mehr, so ist die Pyrolyse abgeschlossen.

Besondere Sicherheitshinweise:

Das Experiment ist unbedingt draußen oder unter einem Abzug durch zu führen. Da in den meisten Fällen mit einem offenen Feuer gearbeitet wird, sind die entsprechenden Feuerschutzrichtlinien ein zu halten. Die entstehenden Holzgase sollten nicht in hoher Konzentration eingeatmet werden.

Video:



[Link zum Video](#)

4.23 Die Kerzenschaukel

Darunter versteht man eine mittig gelagerte Kerze, die unaufhörlich hin und her schwingt.

Materialien und Geräte:

- Kerze (ca. 16 cm)
- Feuerzeug
- Gläser
- Frischhaltefolie oder Alufolie
- Nadel



Abbildung 37: Kerzenschaukel; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen :

Die Kerze wird zu Beginn an einem Ende gekürzt und der Docht wird freigelegt. Um die Nadel mittig durch die Kerze zu stechen, wird diese vermessen. Die präparierte Kerze wird mit der Nadel zwischen zwei Gläsern balanciert, die auf der Folie stehen. Die Folie schützt den Untergrund vor dem Wachs und ermöglicht eine leichtere Entsorgung. Um die Kerze ins Schaukeln zu bringen, werden beide Enden entzündet. Die brennende Kerze sollte sich langsam einschwingen. Die Amplitude wird merklich größer und es kann sogar zu vollständigen Umdrehungen kommen.

Erklärung:

Die Schaukelbewegung entsteht durch einen minimalen Gewichtsunterschied. Die Kerzenflamme schmilzt das Wachs. Durch die gekippte Kerze kann allerdings nur ein Bruchteil des Wachses verbrennen, der Rest tropft von der Kerze. Hat eine Seite mehr Wachs verloren als die andere, bewegt sie sich nach oben. Der Schaukelvorgang verstärkt sich selbst, wie wenn eine Schaukel im richtigen Moment angestoßen wird.

Video:



[Link zum Video](#)

4.24 Die Mini-Schmiede

Eine Kohlenesse lässt sich mit einfachsten Mitteln konstruieren. Hier wird eine Methode demonstriert, um eine kleine, leicht transportierbare und leistungsfähige Kohlenesse herzustellen.

Materialien und Geräte :

- Backofenform
- Modelliergips
- Sand
- Winkelschleifer
- Holzkohle
- Brennspritus
- Zünder
- Stahlrohr mit Gewinde und Endkappe
- Schlauch (Vinyl)
- Grillhandgebläse oder Föhn



Abbildung 38: Mini-Schmiede mit angefeuerten Kohlen; eigenes Bild

Konstruktion:

Genauere Angaben für Mengen und Dimensionen der Bauteile sind schwer anzuführen, da die Geometrie der Backform die Konstruktion entscheidend beeinflusst. Die Backform sollte mindestens 7 bis 10 cm tief und nicht mehr als den fünfzehnfachen Durchmesser des Stahlrohrs breit sein.

Das Stahlrohr wird im Zuge der Konstruktion in der Backform platziert. Dafür muss ein Loch in eine der beiden kürzeren Seitenflächen der Backform geschnitten oder gebohrt werden. Das Loch sollte dabei so groß sein, dass das Rohr samt Endkappe durchgezogen werden kann. Das Rohr selbst muss genau auf der Länge mit einem Winkelschleifer aufgeschnitten

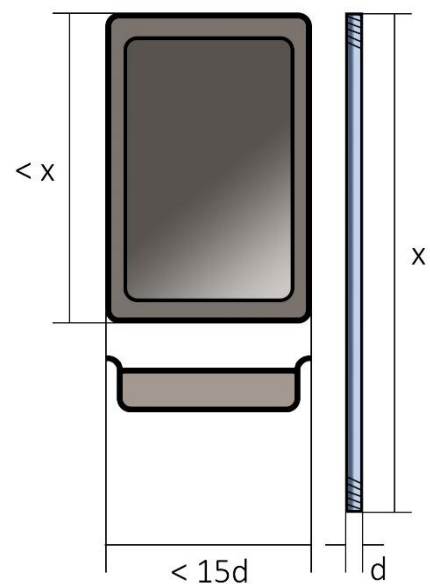


Abbildung 39: Dimensionierungsvorschlag für die Konstruktion der Mini-Schmiede; eigene Grafik

werden, der sich nach dem Abmessen in der Backform befindet. Dieser Schnitt ist in der Abbildung 40 rechts in der Farbe Rot dargestellt. Die Aufgabe dieses Längsschnitts ist es, die Luft von unten durch die Kohlen zu verteilen. Alternativ dazu ist es auch möglich, in regelmäßigen Abständen kleine Löcher zu bohren.

Ist der Zusammenbau bis zu diesem Punkt abgeschlossen, kann der Modellergips mit Sand in einem Mischungsverhältnis 1:1 vermischt werden. Der darauf folgende Arbeitsschritt ist nach der Zugabe von Wasser schnell durchzuführen, da Modellergips meistens zügig aushärtet. Mit dem Gips-Sand-Gemisch ist eine Art Kerbe zu formen, die zur Mitte der Schmiede hin tiefer wird und nur den Schnitt im Stahlrohr an der Oberfläche verbleiben lässt. Zur besseren Illustration ist dieser Arbeitsschritt in Abbildung 41 dargestellt.

Das Gemisch benötigt einen ganzen Tag zum Aushärten. Nach dem Aushärten kann der Vinylschlauch an dem äußeren Gewinde des Stahlrohrs befestigt werden. Über ein Grillgebläse, einen Föhn oder einen Blasebalg lässt sich nun Luft durch den Schlauch direkt unter die Kohlen blasen. Da sich diese Schmiede sowieso nur für kleinere Projekte eignet, ist eine handbetriebene Sauerstoffzufuhr ausreichend. Die Konstruktion ist hier abgeschlossen.

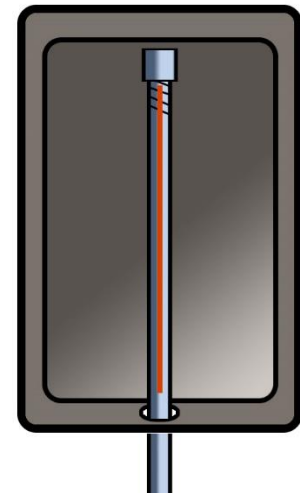


Abbildung 40: Zweiter Arbeitsschritt der Konstruktion der Mini-Schmiede; eigene Grafik

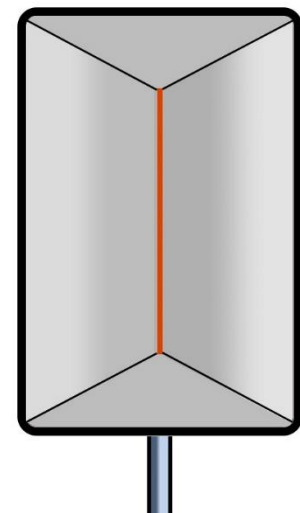


Abbildung 41: Dritter Arbeitsschritt der Konstruktion der Mini-Schmiede; eigene Grafik

Durchführung und Beobachtungen:

Ist die Schmiede einsatzbereit, so wird sie auf der vollen Fläche gehäuft mit Kohle gefüllt. Die Kohle muss entzündet und einige Minuten angeheizt werden, bevor es möglich ist, Stahl auf eine Bearbeitungstemperatur zu bringen. Ist die Kohle angeheizt, so kann das Werkstück aus Stahl in der Kohle versenkt werden. Um den Stahl ausreichend aufzuheizen, ist eine erhöhte Menge Sauerstoff notwendig. Die Sauerstoffzufuhr sollte also im Dauerbetrieb laufen. Weist das Stahlwerkstück ein sattes oranges Glühen auf, so kann es mit einem Hammer auf einem Amboss bearbeitet werden.

Erklärung:

Die Funktionsweise gleicht einer der ältesten Bearbeitungsformen für Metall überhaupt, dem Schmieden mit einer Kohlenesse. Die Kohle besitzt einen deutlich höheren Heizwert als Rohholz, zusätzlich ist die Reaktionsgeschwindigkeit deutlich langsamer, da bei der Herstellung ein vollständiger pyrolytischer Zersetzungsprozess durchlaufen wurde.

vgl. [(24), S. 696]

Die Kohle wandelt bei Oxidation ihre gespeicherte chemische Energie also kontinuierlicher und kontrollierbarer in Wärme um. Diesen Prozess macht man sich zu Nutze um verschiedene Metalle über eine Bearbeitungstemperatur zu heben, um sie unter geringerem Aufwand von mechanischer Arbeit verformen zu können. Für eine Warmumformung wird die sogenannte Rekristallisationstemperatur überschritten. Diese liegt, je nach Kohlenstoffgehalt des Stahls, bei 40 bis 60% der Schmelztemperatur. vgl. [(26)]

Über eine erhöhte Sauerstoffzufuhr kann die Reaktionsgeschwindigkeit verändert werden, da mehr Sauerstoff für die Oxidation zur Verfügung steht.

Besondere Sicherheitshinweise:

Dieses Projekt ist nicht mit Schülerinnen und Schülern direkt im Rahmen des Unterrichts durchführbar, da zu viele Werkzeuge und Arbeitsschritte benötigt werden. Die Schmiede kann aber konstruiert und in der Schule in entsprechenden Räumlichkeiten und unter einem Abzug verwendet werden. Grundsätzlich ist es trotzdem ratsamer, die Schmiede nur im Freien zu betreiben. Zu beachten ist auch, dass der Boden der Backofenform trotz der ausgehärteten Gips Mischung hohe Temperaturen erreichen kann. Beim Arbeiten müssen immer Handschuhe getragen werden.

Video:



[Link zum Video](#)

4.25 Staubexplosion

Kompakte Staubwolken aus unterschiedlichsten feinkörnigen Materialien können ähnlich entzündliche Eigenschaften aufweisen wie brennbare Gase. In diesem Experiment werden Bärlappsporen durch eine Flamme geblasen, um dies zu demonstrieren.

Materialien und Geräte:

- Bärlappsporen, Mehl
- Fackel
- Blasrohr
- Stativmaterial



Abbildung 42: Staubexplosion; eigenes Bild; Material zur Verfügung gestellt von der TU Graz

Durchführung und Beobachtungen:

Das Blasrohr wird mit dem Pulver gefüllt, die Fackel entzündet und am Stativmaterial befestigt. Das Pulver sollte entweder parallel zum Boden oder bei ausreichender Deckenhöhe schräg von unten durch das Feuer geblasen werden. Nach dem Verlassen des Blasrohrs wird das Pulver zerstäubt und trifft so auf die Flammen. Ein Feuerball entsteht, der von den brennenden Partikeln in die Bewegungsrichtung mitgetragen wird. Bärlappsporen sind in Apotheken erhältlich.

Erklärung:

Bärlappsporen oder Mehl sind im Lagerzustand nicht leicht entzündlich, werden sie aber fein zerstäubt, ändern sich die Parameter, die zu einer Oxidation führen können. Die Oberfläche der Partikel ist im Vergleich zu ihrem Volumen, sehr groß, ihre Masse ist klein und die Verfügbarkeit von Sauerstoff groß. Unter diesen Umständen ist eine Oxidation wesentlich leichter herbeizuführen. In diesem Fall reicht ein kleines offenes Feuer als Zündquelle und die Oxidationsreaktion läuft ab.

Video:



[Link zum Video](#)

4.26 Kong Ming Laterne

Eine Kong Ming Laterne ist eine Laterne aus Papier, die auf Grund des Archimedischen Prinzips weit in den Himmel aufsteigen kann. Ihr Einsatz ist aber in Österreich leider verboten.

Materialien und Geräte:

- Kong Ming Laterne
- Laborgasbrenner



Abbildung 43: Kong Ming Laterne; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Da die Laterne in Österreich weder eingeführt noch steigen gelassen werden darf, muss auf schon vorhandene Bestände zugegriffen werden.

vgl. [(27)]

Das Testen der Laternen ist also nur in Innenräumen möglich und auch nur dann, wenn die Funktionsweise der Laterne so beeinflusst wird, dass diese genau jene charakteristischen Eigenschaften verliert, die zu dem Verbot geführt haben. Die Laterne darf also nur entkoppelt, das heißt über einen Brenner mit Heißluft versorgt werden. Dafür wird die Laterne aufgefaltet und von einer Person in die Höhe gehalten. Unter der Laterne wird mit einem Laborgasbrenner Luft erhitzt, so dass diese in die Laterne steigt.

Erklärung:

Der Laborgasbrenner erwärmt die Luft unter der Laterne. Die erwärmte Luft steigt auf Grund ihrer geringeren Dichte auf, weil sie von der kälteren Luft verdrängt wird. Ist das erwärmte Luftvolumen groß genug so steht der Gewichtskraft der Laterne eine gewisse Auftriebskraft entgegen und die Laterne steigt. Kühlt die Luft ab, nimmt ihre Dichte wieder ab, und die Auftriebskraft ist nicht mehr groß genug, um die Laterne zu heben.

Video:



[Link zum Video](#)

4.27 Magnetische Kerzenflamme

Tatsächlich ist es möglich, mit Hilfe von Magneten die Steigrichtung einer Kerzenflamme zu stören.

Materialien und Geräte:

- Neodym-Eisen-Bor Magnet (min. 1 T)
- Kerze
- Zange

Durchführung und Beobachtungen:

Der Magnet wird mittels einer Zange möglichst nahe an die Flamme geführt. Die Flamme muss dabei so ungestört wie möglich und vollkommen

unbeeinflusst von Luftströmungen vertikal brennen. Da die magnetischen Eigenschaften von Neodym Magneten bei leicht erhöhten Temperaturen abnehmen, sollte der Magnet nie in die Flamme geraten. Sollte dies doch passieren, muss der Magnet mit Wasser gekühlt werden, um einer Entmagnetisierung entgegen zu wirken. Der zu beobachtende Effekt ist nicht sehr deutlich, aber ein leichtes Abweichen der Flamme kann beobachtet werden, sobald der Magnet in die Peripherie der Flamme geführt wird.



Abbildung 44: Magnetische Kerzenflamme; eigens Bild

Erklärung:

Eine Abstoßung der Flamme ist ein klarer Hinweis auf ein diamagnetisches Verhalten. Eine günstige Luftströmung kann nicht der Grund sein, da die Flamme sonst bei sehr nahem Objekt auf Grund des Bernoulli-Effekts eher das Objekt umschließen würde. Die Suszeptibilität charakterisiert die Magnetisierbarkeit von Materie in einem äußeren Magnetfeld. Sauerstoff ist in gasförmiger Phase um ein Vielfaches stärker magnetisierbar und wird auf Grund seiner paramagnetischen Eigenschaften stärker vom Magneten angezogen als die anderen Verbrennungsgase. Diese werden einerseits vom Sauerstoff verdrängt und andererseits vom Magneten selbst wegen ihrer diamagnetischen Eigenschaften abgestoßen. Das Resultat ist,

dass die Flamme selbst leicht abgelenkt wird und vom Magneten weg zu kippen scheint. Die Suszeptibilitäten der relevanten Verbindungen können der Abbildung 45 entnommen werden vgl. [(28), S. 305f]

<i>Stoff</i>	<i>Suszeptibilität</i> $\chi \mid 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$
Sauerstoff O ₂	+3449
Kohlenstoffdioxid CO ₂	-21
Wasserdampf H ₂ O	-13

Abbildung 45: Tabelle: Suszeptibilität der betroffenen Gase; eigene Grafik vgl. [(28), S. 306]

Video:



[Link zum Video](#)

4.28 Funkenentladung

Mittels entsprechender Transformatoren ist es möglich, eine Funkenentladung zwischen zwei Metallkontakten zu erzeugen. Durch Impulsübertragung an die umgebende Luft kann der Lichtbogen zwischen den Kontakten in Bewegung gebracht werden.

Materialien und Geräte:

- Spule mit wenig Windungen ($N = 500$)
- Spule mit vielen Windungen ($N = 23000$)
- Weicheisenkern
- Gebogene Metallkontakte
- Netzanschluss (Schuko)

Durchführung und Beobachtungen:

Die beiden Spulen werden mittels Weicheisenkern verbunden. Der so konstruierte Transformator transformiert die Netzspannung auf ca. 10000 V. Vor dem Einschalten werden die zwei Kontakte nahe aneinander geführt ohne sich zu berühren. Wird die Netzspannung nun zu geschaltet, so kann beobachtet werden, wie ein Funke an der engsten Stelle überspringt. Mit korrekter Ausrichtung der Kontakte ist es sogar möglich, dass der Funke von alleine den gebogenen Kontakten entlang läuft und erst an der Stelle mit größtem Abstand abreißt.

Erklärung:

Ein Funkenüberschlag kann stattfinden wenn eine entsprechend große Potentialdifferenz zwischen den zwei Kontakten besteht und ihr Abstand klein genug, aber nicht null ist. Der überspringende Funke ionisiert die Luft und erhöht so ihre Leitfähigkeit, was wiederum einen Stromfluss ermöglicht. Der hohe Strom erwärmt die Luft. Auf Grund des Archimedischen Prinzips steigt die Luft auf und zieht den Funken mit. Der Funken wandert ans obere Ende, bis der Abstand zu groß wird und er abreißt.

vgl. [(29)]

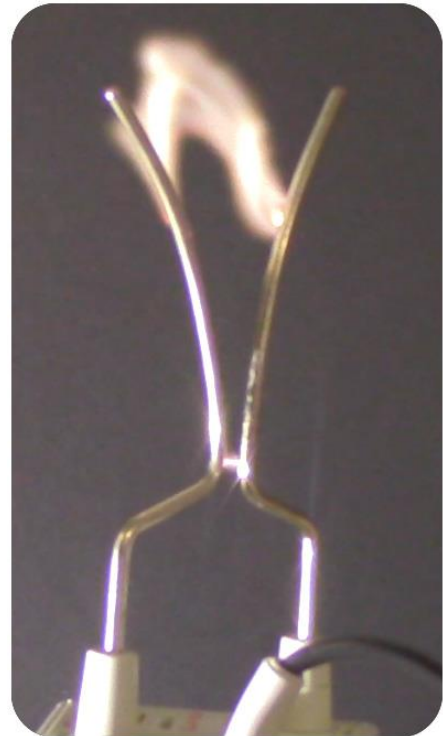


Abbildung 46: Funkenentladung durch Transformieren der Netzspannung; eigenes Bild; Material zur Verfügung gestellt von der TU Graz

Zur Erläuterung der Schaltung folgt ein Prinzipschaltbild.

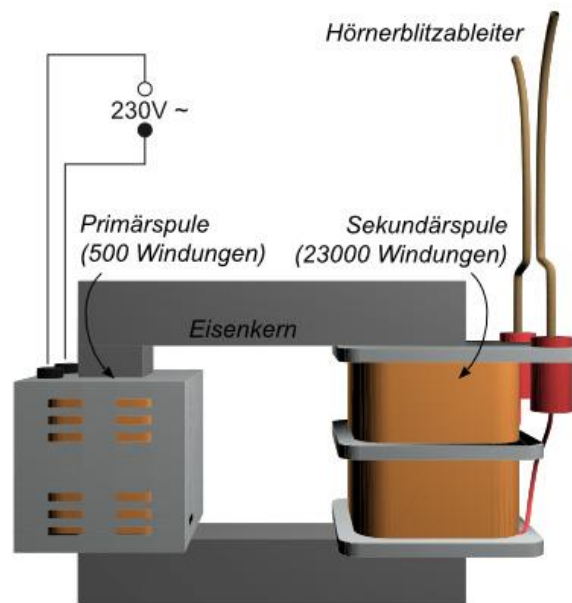


Abbildung 47: Prinzipschaltbild des Experiments zur Funkenentladung; [(29), Abbildung 5843]; Gerät der Firma Leybold zur Verfügung gestellt von der TU Graz

Besondere Sicherheitshinweise:

Während des Experiments darf nichts zwischen die zwei Kontakte gebracht werden. Es besteht akute Lebensgefahr.

Video:



[Link zum Video](#)

4.29 Erzeugen eines Magnetfelds durch Thermoelektrizität

Durch die Verwendung von unterschiedlichen Metallen (Kupfer und Konstantan) und hohen Temperaturdifferenzen ist es mittels Thermostromen möglich, starke Magnetfelder zu induzieren.

Materialien und Geräte:

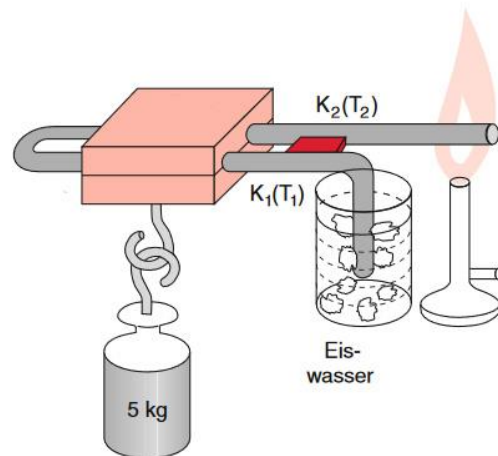
- Metallbügel
- Teilbares Eisengewicht mit Haken
- Eiswasser
- Laborgasbrenner
- Handschuhe

Durchführung und Beobachtungen:

Der Metallbügel wird in das Gewicht eingesetzt und an einem Ende mit Eiswasser stark gekühlt. Das andere Ende des Bügels wird mit dem Laborgasbrenner erhitzt. Nach einer Minute sollte es möglich sein das Metallgewicht samt Haken und Bügel aufzuheben. Dabei sind immer Handschuhe zu tragen.

Erklärung:

Verantwortlich für diesen Effekt ist eine hohe Thermospannung, die entsteht, wenn die Lötstellen im Bogen des Bügels stark unterschiedliche Temperaturen erfahren. Diese Lötstellen sind für den Halt eines zweiten metallischen Werkstoffes in Form eines Stegs zwischen den Bügelenden verantwortlich. Die eine Lötstelle wird durch das Eiswasser stark gekühlt, die andere durch den Laborgasbrenner erhitzt. Das Resultat ist eine Thermospannung



$K_1(T_1)$... Lötstelle die auf Temperatur T_1 abgekühlt wird

$K_2(T_2)$... Lötstelle die auf Temperatur T_2 erhitzt wird

Abbildung 48: Schematischer Aufbau des Experiments; vgl. [(30), S. 76, Abbildung 2.62]



Abbildung 49: Durch Thermoelektrizität induziertes Magnetfeld; eigenes Bild; Material zur Verfügung gestellt von der TU Graz

zwischen den beiden Lötstellen, die einen Stromfluss im Bügel verursacht. Dieser Effekt wird Seebeck-Effekt genannt. Abhängig vom elektrischen Widerstand des Bügels kann dieser Strom Stromstärken von mehreren hundert Ampere erreichen. Der elektrische Widerstand hängt hier stark von der Länge und dem Durchmesser des Kupferbügels ab. Der Durchmesser beträgt ca. 1 cm² und damit beläuft sich der Stromfluss auf ca. 80 Ampere. Ein stromdurchflossener Leiter erzeugt ein Magnetfeld. Dieses Magnetfeld sorgt nun dafür, dass die Metallplatten des Eisengewichts sich gegenseitig anziehen. So kann das gesamte Gewicht samt Bügel aufgehoben werden. Nach einigen Sekunden ohne Erhitzung wird die Lötstelle erkalten, die Thermospannung sinken und das Magnetfeld schwächer werden. vgl. [(30), S. 75f]

Besondere Sicherheitshinweise:

Während des Erhitzens und Abkühlens, darf der Metallbügel nicht berührt werden. Das Gewicht darf nur mit Handschuhen und auch nur am Haken aufgehoben werden. Beim Aufheben ist darauf zu achten, dass sich die magnetische Verbindung der Platten jederzeit lösen kann. Darum sollte das Gewicht nie sehr hoch aufgehoben werden. Nach dem Experimentieren sollte der Bügel mit Wasser gekühlt werden.

Video:



[Link zum Video](#)

4.30 Schwarzer Strahler (Hohlkörperstrahlung)

Um die Eigenschaften eines Schwarzen Strahlers anschaulich dar zu stellen, eignet sich ein eigens dafür konzipierter Zylinder mit einer Bohrung, deren Tiefe in einem Verhältnis von 10:1 zu dem Durchmesser des Zylinders steht.

Materialien und Geräte :

- Spezialzylinder (Graphit)
- Propangasbrenner
- Stativmaterial

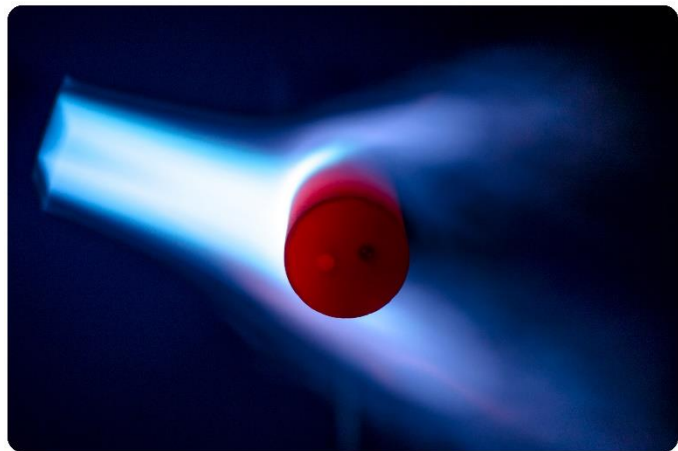


Abbildung 50: Erhitzung des Graphitzylinders zur Demonstration der Schwarzkörperstrahlung; eigenes Bild; Spezialzylinder zur Verfügung gestellt von der TU Graz

Durchführung und Beobachtungen:

Bei diesem Experiment wird das Strahlungsverhalten eines Schwarzen Strahlers demonstriert. Der Zylinder wird am Stativ befestigt und bis zur Rotglut mit der Flamme eines Propangasbrenners seitlich erhitzt. Nach dem Erhitzen glüht die Bohrung erkennbar heller als der restliche

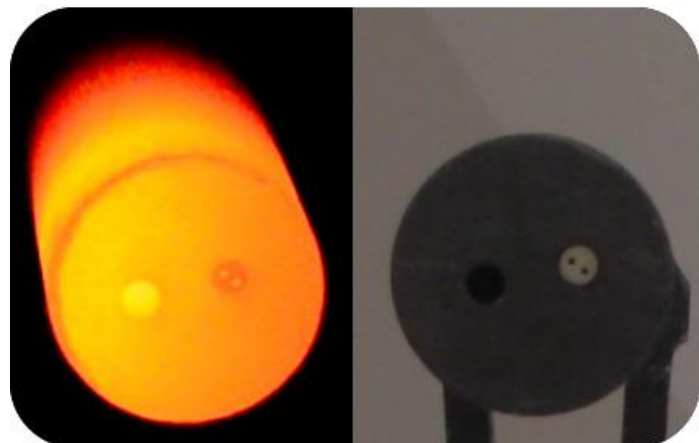


Abbildung 51: Vergleich des Zylinders im erhitzten Zustand (links) und im kalten Zustand (rechts); eigenes Bild; Spezialzylinder zur Verfügung gestellt von der TU Graz

Zylinder. Ebenso lässt sich beobachten, dass die weiße Oberfläche, die im kalten Zustand heller erschienen ist, nun deutlich dunkler ist als die Bohrung.

Erklärung:

Das auftretende Phänomen lässt sich über die Hohlkörperstrahlung erklären. Die Tiefe der Bohrung entspricht dem zehnfachen Durchmesser der Öffnung. Beim Erhitzen des Graphitzylinders strahlt dieser, gemäß dem Planck'schen Strahlungsgesetz, Wärmestrahlung einer bestimmten Wellenlänge ab, die ausschließlich von der Temperatur des Zylinders

abhängt. Die Wärmestrahlung wird über die gesamte Oberfläche emittiert, daher strahlt auch das Innere der Bohrung. Auf Grund der speziellen Geometrie dieser Bohrung kann das Strahlungsverhalten eines Schwarzen Körpers erreicht werden. Die Öffnung der Bohrung strahlt heller als die restliche Graphitoberfläche gleicher Temperatur, weil das Emissionsvermögen eines Schwarzen Strahlers den höchst möglichen Wert hat. vgl. [(2), S. 74]

Besondere Sicherheitshinweise:

Durch die hohe Temperatur, die bei dem länger andauernden Aufheizen erreicht wird, könnten die Halteflächen aus Kork beschädigt werden.

Video:



[Link zum Video](#)

4.31 Streichholz in der Mikrowelle

Mit einem Streichholz und einem Glas lässt sich Plasma in einer Mikrowelle erzeugen und auffangen.

Materialien und Geräte:

- Streichhölzer
- Korken
- Mikrowelle
- Glas

Durchführung und Beobachtungen:

Der Drehteller und die Spindel müssen vor dem Experiment aus dem Innenraum der Mikrowelle entfernt werden. Das Streichholz wird in einen Korken gesteckt, in der Mitte des Innenraumes der Mikrowelle platziert und entzündet. Darüber wird ein Glas gestülpt. Die Flamme muss ausreichend Sauerstoff erhalten, daher kann es sein, dass das Glas eventuell ebenfalls auf Korken gelagert werden muss. Ist das Streichholz entzündet und das Glas in Position, kann die Mikrowelle geschlossen und eingeschaltet werden. Nach wenigen Augenblicken bildet sich Plasma, das vom Glas aufgefangen wird.



Abbildung 52: Erzeugung von Plasma in der Mikrowelle;
eigenes Bild

Erklärung:

Der gasförmige Kohlenstoff, der bei der Verbrennung entsteht, leitet elektrischen Strom besser als die umgebende Luft. Der Brennvorgang findet in einem elektrischen Feld statt und das Gas ist elektromagnetischen Wellen mit einer Wellenlänge im Zentimeterbereich ausgesetzt. Das elektrische Feld beschleunigt die durch die Strahlung entstandenen, freien Ladungsträger und erhöht ihre Energie. Das Gas wird ionisiert. Es entsteht also Plasma, solange die Mikrowelle ausreichend Ionisationsenergie in Form von elektromagnetischer Strahlung liefert.

vgl. [(31), S. 2f]

Besondere Sicherheitshinweise:

Die Mikrowelle sollte unmittelbar nach Entstehung des Plasmas sofort wieder abgeschaltet werden, da sonst die Gefahr besteht, das Glas zu zerstören und so das Gerät durch das aufsteigende Plasma in Brand zu setzen. Während des gesamten Experiments sind Handschuhe zu tragen. Das Glas ist bei der Entnahme aus der Mikrowelle noch sehr heiß.

Video:



[Link zum Video](#)

4.32 Der Flaschengeist

Mit einem verschließbaren Glasbehälter und etwas Brennspritus oder Ethanol, lässt sich ein Flaschengeist beschwören und gleichzeitig der Bernoulli-Effekt demonstrieren.

Materialien und Geräte:

- verschließbares Glasbehältnis
- Stabfeuerzeug
- Ethanol, Brennspritus
- Bohrer

Durchführung und Beobachtungen:

Mit einem Bohrer wird ein Loch in den Deckel des Glasgefäßes gebohrt. Dann kann der Brennstoff in das Glas gefüllt und der Deckel aufgeschraubt werden. Vor dem Entzünden sollte das Loch abgedeckt und das Glas samt eingefültem Brennstoff kurz geschüttelt werden, um die Flüssigkeit besser zu verteilen. Treten die Dämpfe des Brennstoffs in Kontakt mit der Flamme, entzünden sie sich sofort und entweichen aus dem Glas. Das Glas wird dabei minimal nach unten beschleunigt.



Abbildung 53: Der Flaschengeist; eigenes Bild

Erklärung:

Die Gase, die bei der Verdunstung von Brennspritus oder Ethanol entstehen sind leicht entzündlich. Sie verteilen sich im verschraubten Glas und entweichen langsam über das Loch im Deckel. Werden diese Gase entzündet, so verbrennen zuerst jene Teilchen, denen genug Sauerstoff zur Verfügung steht und die näher an der Zündquelle sind. Das verbrennende Gas entweicht durch das Loch im Deckel. Da das entweichende Volumen groß ist, die Öffnung aber klein, ist die Geschwindigkeit, mit der das Gas entweicht, hoch. Es wirkt so, als würde das Feuer den Brennstoff aus dem Glas saugen.

Video:



[Link zum Video](#)

4.33 Wärmeleitung verschiedener Metalle

Metalle weisen alle unterschiedliche Wärmeleitungseigenschaften auf. Dies lässt sich mit schmelzendem Bienenwachs gut demonstrieren.

Materialien und Geräte:

- Metallstäbe(Kupfer, Aluminium, Zink, Stahl)
- Stativ
- Laborgasbrenner
- Bienenwachs



Abbildung 54: Wärmeleitungsverlauf verschiedener Metalle; eigenes Bild; Konzeption des Aufbaus von Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gernot Pottlacher; zur Verfügung gestellt von der TU Graz

Durchführung und Beobachtungen:

Die vier gleichlangen Metallstäbe werden im Stativ in einem Metallblock verankert. Auf die Enden der Stäbe wird das Bienenwachs aufgelegt. Der Metallblock, der alle Stäbe verbindet, wird mit einem Laborgasbrenner aufgeheizt. Nach kurzer Zeit beginnen die Wachsproben, je nach Wärmeleitung des entsprechenden Metallstabes, zu schmelzen. Wachs auf dem Kupfer wird zuerst schmelzen, gefolgt von Aluminium, Zink und zuletzt Stahl.

Erklärung:

Kupfer besitzt gute Wärmeleitungseigenschaften und gibt die Wärme vom erhitzten Metallblock besser an die Wachsprobe weiter. Stahl besitzt wesentlich schlechtere Wärmeleitungseigenschaften. Deswegen wird die Wachsprobe auf dem Stahlstab zuletzt schmelzen. Alle Proben schmelzen zeitverzögert, je nach Wärmeleitungskoeffizient.

Koeffizienten: Kupfer: $393 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, Aluminium: $221 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, Zink: $112 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, Stahl: $67 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$

vgl. [(10), S. 294, Tabelle 10.6]

Video:



[Link zum Video](#)

4.34 Die Wasserlinse

Paradoxerweise lässt sich mit Wasser Feuer machen. Dieses Experiment demonstriert eine einfache Wasserlinse zur Bündelung von Sonnenlicht.

Materialien und Geräte:

- Frischhaltefolie
- Wasser
- Becher oder Schüssel
- Zunder



Abbildung 55: Wasserlinse; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Um genug Wasser in der Frischhaltefolie halten zu können, wird diese in einen Becher oder eine Schüssel gehängt und fixiert. Dann kann das Wasser in die Folie geschüttet werden. Durch ein Falten der Folie wird das Wasser eingeschlossen, dabei ist darauf zu achten, Lufteinschlüsse zu vermeiden, da diese die Funktion der Linse wesentlich beeinträchtigen. Um die Folie an der Oberfläche zu spannen, kann die geformte Wasserlinse eingedreht werden. Mit der fertigen Linse kann Sonnenlicht gebündelt werden. Bei richtiger Handhabung und passendem Abstand zum Zunder kann dieser schon nach wenigen Sekunden entzündet oder zumindest verkohlt werden.

Erklärung:

Die geformte Linse ähnelt in Form und Funktion einer nichtsphärischen, dicken Sammellinse. Auf Grund der unkontrollierbaren Geometrie der Wasserlinse lässt sich auch der Brennpunkt nicht exakt abbilden. Trotzdem ist es durch die Bündelung von Sonnenlicht lokal möglich eine, sehr hohe Temperatur zu erreichen. Genug, um Papier oder ähnlichen Zunder zu verkohlen. Besonders eignet sich dunkles dünnes Papier, da es mehr von dem Sonnenlicht absorbiert. vgl. [(30), S. 271-273]

Video:



[Link zum Video](#)

4.35 Flammen ersticken

Um zu demonstrieren wie ein Feuer erstickt werden kann eignet sich besonders gut selbst hergestelltes Kohlenstoffdioxid.

Materialien und Geräte:

- Teelichter
- Backpulver (NaHCO_3)
- Essig
- Glasbehältnis

Durchführung und Beobachtungen:

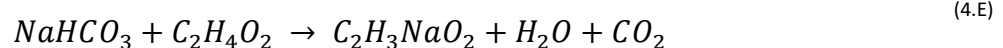
Zur Herstellung des Kohlenstoffdioxids wird das Backpulver in ein Gefäß geschüttet und mit Essig aufgeschüttet. Bei der sofort einsetzenden chemischen Reaktion entsteht Kohlenstoffdioxid und bleibt im Glas zurück, da es schwerer ist als Luft. Durch vorsichtiges Kippen des Gefäßes kann das schwere Gas über brennende Teelichter geschüttet werden. Die Flammen der Teelichter werden sofort ausgehen.



Abbildung 56: Ersticken einer Kerzenflamme mit Kohlenstoffdioxid; eigenes Bild

Erklärung:

Die im Essig enthaltene Essigsäure ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$) reagiert mit dem Backpulver (NaHCO_3) und dabei entsteht das Salz Natriumacetat ($\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$), Wasser und Kohlenstoffdioxid (CO_2). Die folgende Reaktionsgleichung beschreibt den Prozess:



Da CO_2 schwerer ist als Luft, verdrängt es beim Ausschütten über den Teelichtern den Sauerstoff im Luftgemisch und stoppt so die Oxidationsreaktion. Findet keine Oxidation mehr

statt erlöschen auch die Flammen. Man nennt dies „Ersticken“ der Flammen, da ihnen die Sauerstoffzufuhr gekappt wird.

Video:



[Link zum Video](#)

4.36 Streichholzrakete

Mit einfachsten Mitteln lassen sich beeindruckend gute Streichholzraketen konstruieren, die sogar mehrere Meter mit hoher Geschwindigkeit zurücklegen können.

Materialien und Geräte:

- Streichhölzer
- Holzspieße
- Alufolie
- Draht
- Feuerzeug

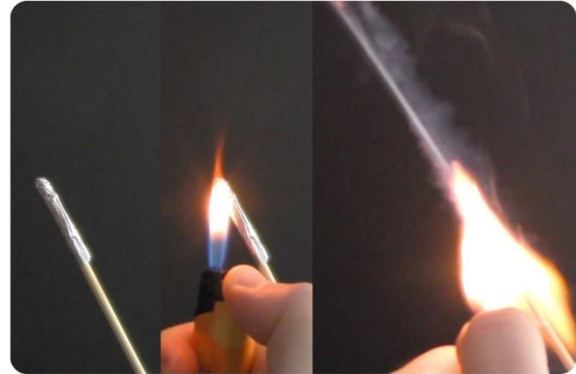


Abbildung 57: Zündung einer Streichholzrakete; eigenes Bild

Herstellung:

Um flugfähige Raketen herzustellen bedarf es einiges an Experimentierfreude

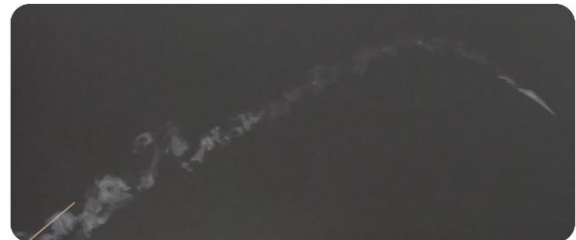


Abbildung 58: Flug einer Streichholzrakete; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Abbildung 59 illustriert die Konstruktion in 4 einfachen Schritten. Um eine Rakete zu bauen, wird ein kleines Stück Alufolie benötigt, welches um das Holzstäbchen gewickelt wird. Am Ende des Holzstäbchens wird der abgetrennte Kopf des eines Streichholzes platziert und zusammen mit einem Draht

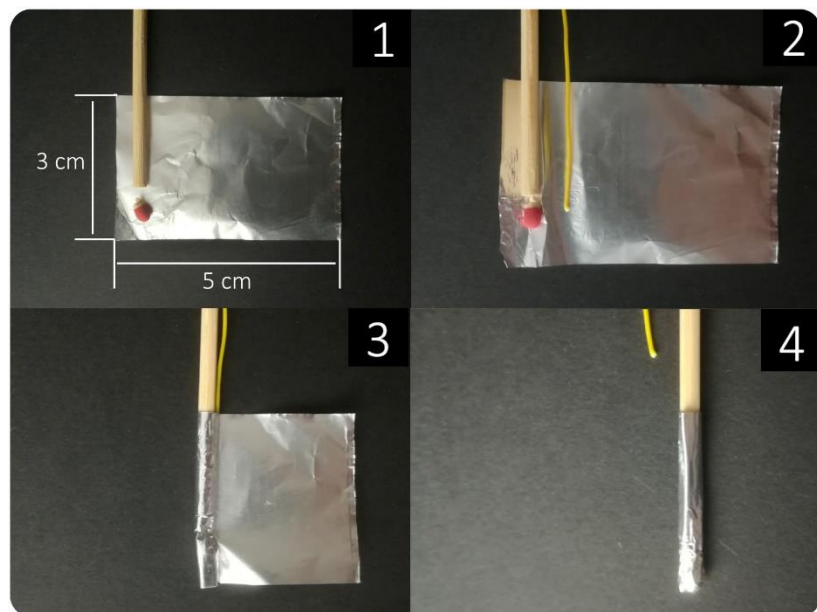


Abbildung 59: Konstruktion einer Streichholzrakete; eigenes Bild

beim Eindrehen der Alufolie mit verdrillt. Nach dem Drehen muss der Draht wieder entfernt

werden. Durch den dünnen Kanal der zurückbleibt können die Gase, die bei der Zündung entstehen, entweichen. Gezündet wird die Rakete mit einem Feuerzeug das unmittelbar unter dem eingewickelten Streichholzkopf platziert wird. Das Holzstäbchen kann entweder mit der Hand fixiert oder im Boden versenkt werden.

Erklärung:

Durch die Flamme des Feuerzeugs erhitzt sich die Alufolie soweit, dass der Streichholzkopf zündet. Die dabei entstehenden Gase und die erwärmte Luft werden durch den dünnen Kanal nach außen gedrückt und beschleunigen die kompakte Alufolie und den Streichholzkopf, auf Grund des dritten Newtonaxioms, in die Gegenrichtung.

Video:



[Link zum Video](#)

4.37 Die Butterkerze

Mit einem Block Butter und einem Papiertaschentuch lässt sich eine Kerze herstellen, die mehrere Stunden brennt.

Materialien und Geräte:

- Butter
- Papiertaschentuch
- Feuerzeug
- Zahnstocher



Abbildung 60: Butterkerze; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Das Taschentuch formt den Docht und muss zu diesem Zweck in eine entsprechend lange fadenförmige Form gebracht werden. Mit dem Zahnstocher wird ein Loch in ein Stück Butter gedrückt und der Docht wird ebenfalls mit Hilfe des Zahnstochers eingeführt. Die Spitze des Dochts muss vor der Verwendung noch eingefettet werden. Anschließend kann die Kerze bereits verwendet werden.

Erklärung:

Butter besteht zu einem gewissen Teil aus Milch- bzw. tierischen Fetten. Die Gase dieser Substanzen sind brennbar. Wird der getränkte Docht erhitzt, so schmilzt die Butter und steigt durch die Kapillarwirkung im Docht auf. Durch die höhere Temperatur nahe der Flamme verdunstet die Butter und die Gase der Öle und Fette erhalten die Flamme. Wie bei einer Kerze aus Wachs brennt nicht der Docht, sondern es brennen die entzündlichen Gase des Kerzenmaterials.

vgl. [(14), S. 386]

Video:



[Link zum Video](#)

4.38 Napalm

Napalm wurde vor allem im Vietnam als Kampfstoff eingesetzt, verbrennt sehr intensiv und klebt beim Verbrennungsvorgang an nahezu jeder Oberfläche. Dieses Experiment soll die Gefährlichkeit von Napalm demonstrieren.

Materialien und Geräte:

- Benzin
- feuerfestes Glasbehältnis
- Kochplatte
- Kochtopf
- Wasser
- Blockseife
- Käsereibe
- Rührstab
- Atemmaske (Schutzklasse FFP-3)



Abbildung 61: Festklebender Napalmbrand; eigenes Bild

Herstellung:

Zu Beginn wird mit Hilfe der Käsereibe eine Blockseife zerrieben. Die geriebene Seife wird im feuerfesten Glasbehältnis aufbewahrt. Der Kochtopf wird zur Hälfte mit Wasser gefüllt und auf der Kochplatte im Freien erhitzt, bis das Wasser kocht. Anschließend wird der Topf von der Platte gehoben und das Glasbehältnis mit den Seifenstückchen in das heiße Wasser gestellt. Ab diesem Arbeitsschritt muss eine Atemmaske und ein Augenschutz getragen werden. Für einen Teil Seife werden zwei Teile Benzin in das Glasbehältnis geschüttet. Die Mischung muss mindestens 15 Minuten durchgehend gerührt werden. Hat die Mischung eine Struktur und Viskosität von Marmelade, ist sie fertig und kann getestet werden.

vgl. [(32), S. 50f]

Durchführung und Beobachtungen:

Die streichfähige Substanz kann an diversen Oberflächen festgestrichen und entzündet werden. Beim Verbrennen wird sich die Haftfähigkeit verstärken. Napalm brennt lange, intensiv und heiß. Objekte die mit Napalm in Berührung kommen, verbrennen meist komplett mit.

Erklärung:

Die Seife löst sich bei der Herstellung gänzlich auf und bindet das Benzin in einer gelartigen Substanz. Beim Entzünden brennen die Benzingase und schmelzen die Seife Reste. Diese setzen sich dabei an vielen Oberflächen fest. vgl. [(32), S. 51f]

Besondere Sicherheitshinweise:

Benzindämpfe sind giftig und können Augenreizungen hervorrufen, deswegen ist es unbedingt notwendig, Atemschutz der Schutzklasse FFP-3 zu tragen und die Augen zu schützen. Der Kochprozess des Benzins darf nur im Freien oder unter einem Abzug erfolgen. Ebenso sind mögliche Zündquellen im Herstellungsprozess fern zu halten. Napalm ist in großen Mengen schwer zu löschen und im Brennvorgang nicht von der betroffenen Oberfläche zu lösen. Kleine Mengen Napalm, wie sie in diesem Herstellungsprozess erzeugt werden, können problemlos mit Wasser gelöscht werden.

Video:



[Link zum Video](#)

4.39 Feuermachen mit einem Handbohrer

Das Feuermachen mit einem Handbohrer zählt zu den ältesten Überlebenstechniken. Mit den richtigen Materialien und Geduld kann auf diese Weise relativ schnell ein Feuer gemacht werden.

Materialien und Geräte:

- Zylindrischer Holzstab (ϕ ca. 1,5 cm)
- Holzbrett (weiches Holz, zB. Fichte)
- Asche, Sand
- Watte
- Papier
- Taschenmesser



Abbildung 62: Entnehmen der Spindel nach dem Bohren; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Bevor der Handbohrer angesetzt werden kann, muss das Holzbrett präpariert werden. Dazu wird eine Kerbe in eine der Kanten geschnitzt, bis eine kleine Öffnung mit trapezförmiger Grundfläche entsteht. An die kürzere Seitenkante dieses Trapezes, also auf der Innenseite des Bretts, wird ein kreisförmiger Querschnitt vorgebohrt. Hier wird der Handbohrer angesetzt. Dafür empfiehlt es sich, den Holzstab leicht zu-zu-spitzen. Die Oberfläche des Bohrers sollte mit einer maximalen Fläche aufliegen. Um die Vorbereitungen abzuschließen, wird ein Blatt Papier unter das Holzbrett gelegt, sodass es leicht mit dem abgetragenen verkohlten Holz, das in die Kerbe gefallen ist, entfernt werden kann. Um die Reibung zu verstärken, kann eine kleine Menge Sand oder Asche unter dem Handbohrer platziert werden. Der Handbohrer wird in die vorgebohrte Mulde eingesetzt und kann durch Abrollen zwischen den Handflächen in Rotation versetzt werden. Dabei ist immer eine moderate Vertikalkraft auf das Holzbrett aus zu üben. Die Hände sollten also bei der Reibbewegung von oben nach unten geführt werden. Je gleichmäßiger die Bewegung ausgeführt wird desto schneller wird eine dünne Rauchfahne aufsteigen. Ist genug Material in



Abbildung 63: Entzünden des verkohlten Holzabriebs; eigenes Bild

der Kerbe gesammelt, kann es mit dem Blatt Papier entfernt werden. Durch vorsichtiges Erhöhen der Sauerstoffzufuhr kann mit dem verkohlten Abrieb und der Watte ein Feuer entfacht werden.

Erklärung:

Die Verkohlung und Abtragung des Materials hängen mit dem Zusammenspiel aus Haft- und Gleitreibung zusammen. Abhängig vom Material des Holzstabes selbst und der Kraft, mit der dieser auf das Holzbrett gedrückt wird, ist Arbeit aufzuwenden um den Handbohrer aus seiner Ruhelage zu bewegen. Auch bei Drehung befindet sich der Holzbohrer in Kontakt mit dem Brett und es wird Arbeit benötigt, um die Bewegung aufrecht zu erhalten. Abhängig von der Drehgeschwindigkeit und der Kraft, mit welcher der Bohrer auf das Brett gepresst wird, ändert sich die aufzuwendende mechanische Arbeit und damit auch jener Betrag, der in Reibungswärme umgewandelt wird. Der Grund liegt darin, dass ab gewissen Geschwindigkeiten die Menge an abgetragenen Material pro Umdrehung stärker anwächst, dadurch die Reibungskräfte zunehmen und mehr Arbeit pro Zeiteinheit notwendig ist, um die Geschwindigkeit zu halten. Die Effizienz hängt bei diesem Experiment stark vom Verhältnis von Kraft zu Geschwindigkeit ab. vgl. [(10), S. 186ff]

Besondere Sicherheitshinweise:

Das Experiment ist im Freien durchzuführen. Der Handbohrer wird auf der Unterseite bereits nach wenigen Umdrehungen sehr heiß und sollte nicht mehr berührt werden. Es sollte unter keinen Umständen mit Handschuhen gearbeitet werden, da sich diese einrollen oder verhaken könnten.

Video:



[Link zum Video](#)

4.40 Magnetische Streichhölzer

Erstaunlicherweise sind abgebrannte Streichholzköpfe manchmal magnetisierbar. Dieser Effekt und die Begründung dafür werden in diesem Experiment erläutert.

Materialien und Geräte:

- Streichhölzer (viele verschiedene)
- Neodym-Eisen-Bor Magnet

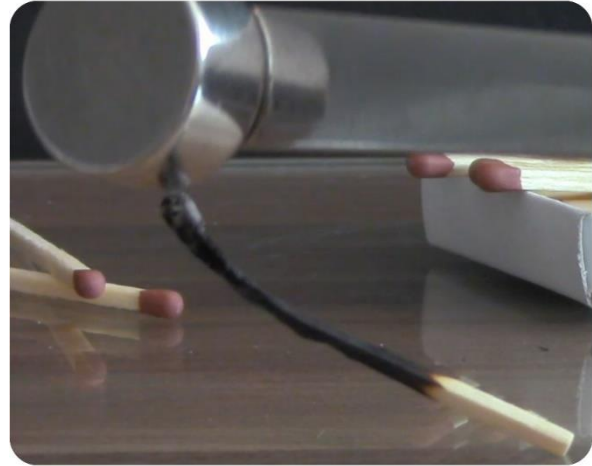


Abbildung 64: Magnetisches Streichholz; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Die Streichhölzer können normal entzündet werden. Wenn die Hälfte der Hölzer verkoht wurde, wird das Feuer gelöscht. Die zurückbleibenden verkohten Reste sind magnetisierbar. Ob der Magnet sie anzieht hängt zum einen von der Art und zum anderen vom Gewicht der Hölzer ab. Ist, unter Einwirkung des Magnetfelds, eine Regung der Hölzer aber keine vollständige Anziehung zu beobachten, so kann der Streichholzkopf abgetrennt werden.

Erklärung:

In Streichholzköpfen ist Eisenoxid (Fe_2O_3) enthalten. Eisenoxid weist paramagnetische Eigenschaften auf. Es ist also durch ein externes Magnetfeld magnetisierbar. Ein nicht entzündetes Streichholz haftet jedoch nicht an einem Magneten. Das liegt daran, dass das magnetische Moment des Eisenoxids zu schwach ist, um die Gewichtskraft des Holzes auszugleichen. Bei der Verbrennung des Streichholzes entsteht im Streichholzkopf Magnetit (Fe_3O_4) mit ferromagnetischen Eigenschaften. Das resultierende magnetische Gesamtmoment des Fe_3O_4 ist groß genug, um der Gewichtskraft entgegenwirken zu können. Das Resultat ist, dass das Streichholz angezogen wird. Da leider nicht messbar ist, wieviel Magnetit bei der Oxidation unterschiedlicher Streichhölzer entsteht, sollten mehrere Marken getestet werden. vgl. [(33)]

Video:



[Link zum Video](#)

4.41 Der brennende Geldschein

Dies ist ein verantwortungslos wirkendes Experiment, bei dem man sich aber, bei richtiger Vorbereitung, weder einem gesundheitlichen noch einem finanziellen Risiko aussetzt.

Materialien und Geräte:

- Geldschein
- Wasser
- Ethanol (96%)
- Glasbehältnis
- Zange



Abbildung 65: Brennender Geldschein; eigenes Bild

Durchführung und Beobachtungen:

Um die richtige Konzentration an Alkohol in der Mischung zu erhalten wird Wasser mit gleichen Teilen Alkohol vermischt. Das Mischungsverhältnis von Wasser zu Alkohol ist also 1:1, wenn 96%iger Alkohol verwendet wird. Wird Alkohol mit einem anderen Volumensanteil verwendet, so sollte die Mischung eine Konzentration von etwa 40 bis 50% Alkohol enthalten. In diese Mischung wird der Geldschein getränkt. Es ist darauf zu achten, dass der Schein gut durchtränkt wird. Ist das der Fall, kann er mit einer Zange entnommen und entzündet werden. Bei Beobachtung der Flammen lässt sich erkennen, dass diese mehrere Millimeter über dem Papier brennen und ausgehen, bevor das Papier zu verkohlen beginnt.

Erklärung:

Der Geldschein verbrennt nicht mit weil, die Mischung in der er getränkt wurde, mindestens 50% Wasser beinhaltet. Dieses Wasser verdampft, wenn es durch die brennenden Dämpfe des Ethanol's erhitzt wird. Da Wasser eine sehr hohe Verdampfungswärme besitzt, ist viel Energie notwendig, um flüssiges Wasser zu verdampfen. Diese Energie kann nicht in Wärme umgewandelt werden und schützt so das Papier vor dem Verbrennen. vgl. [(9), S. 437f]

Video:



[Link zum Video](#)

5 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: EXPERIMENTIEREN IM PHYSIKUNTERRICHT (MINDMAP); EIGENE GRAFIK; VGL. ABB. 14.2 [3] SEITE 109	5
ABBILDUNG 2: ENDOTHERME UND EXOTHERME PROZESSE; EIGENE GRAFIK.....	13
ABBILDUNG 3 : TABELLE BINDUNGSENTHALPIEN ; VGL. [(9), TABELLE 8.4, S. 320]	18
ABBILDUNG 4: BRENNWERTTABELLE; VGL. [(9), TABELLE 5.5, S. 198]	20
ABBILDUNG 5 : CARNOTSCHER KREISPROZESS ; [(10), S. 314]	25
ABBILDUNG 6: MODELL ZUR ERLÄUTERUNG DES WÄRMELEITUNG; VGL. [(15), S. 632, ABBILDUNG 17.1 A)].....	33
ABBILDUNG 7: HOHLRAUMSTRAHLUNG; EIGENES BILD, VGL. [(15), S.639, ABBILDUNG 17.5].....	38
ABBILDUNG 8: WELLENLÄNGENABHÄNGIGKEIT DER STRAHLUNGSLEISTUNG EINES SCHWARZEN KÖRPERS; VGL. [(15), S. 640, ABBILDUNG 17.6].....	39
ABBILDUNG 9: BRENNENDE RÜCKSTÄNDE DER THERMITREAKTION; EIGENES BILD	39
ABBILDUNG 10: DAS VERBRENNUNGSDREIECK; EIGENE GRAFIK	40
ABBILDUNG 11: BRENNZONEN EINER KERZENFLAMME; [(17), S. 386, ABBILDUNG 8-10]	42
ABBILDUNG 12: EINTEILUNG VON PLASMEN IN DICHTEN UND TEMPERATURBEREICHE; [(18), S.3, ABBILDUNG 1.1]	43
ABBILDUNG 13: AUFBAU : KUPFERKATALYSE DER ACETONOXIDATION ; EIGENE GRAFIK	44
ABBILDUNG 14: OPTISCHER EFFEKT DER KATALYSEREAKTION ; EIGENES BILD	44
ABBILDUNG 15: BRENNENDE STAHLWOLLE; EIGENES BILD	46
ABBILDUNG 16: ENTZÜNDEN VON BUTANGASBLASEN IN DER HAND; EIGENES BILD.....	47
ABBILDUNG 17: KERZE ÜBER RAUCHSÄULE WIEDER ENTZÜNDEN; EIGENES BILD	49
ABBILDUNG 18: WÄRMELEITUNG VON STAHL; EIGENES BILD.....	50
ABBILDUNG 19: THERMITREAKTION; EIGENES BILD.....	51
ABBILDUNG 20: PRINZIP DER DAVY GRUBENLAMPE; EIGENES BILD	53
ABBILDUNG 21: AEROSOL-FLAMMENWERFER; EIGENES BILD.....	54
ABBILDUNG 22: FLIEGENDER TEEBEUTEL; EIGENES BILD	55
ABBILDUNG 23: BRENNENDES HANDGEL; EIGENES BILD	56
ABBILDUNG 24: STARLITE; EIGENES BILD	57
ABBILDUNG 25: DIE PHARAOSCHLANGE; EIGENES BILD	59
ABBILDUNG 26: LÄNGENEXPANSION EINES METALLSTABES; EIGENES BILD; MATERIAL ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ	61
ABBILDUNG 27: THERMISCHE EXPANSION EINER STAHLKUGEL; EIGENES BILD; MATERIAL ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ	63
ABBILDUNG 28: DAS SINGENDE ROHR; EIGENES BILD; STAHLROHR ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON AO.UNIV.-PROF. DIPL.-ING. DR. TECHN. GERNOT POTTLACHER.....	65
ABBILDUNG 29: FETTBRAND MIT WASSER LÖSCHEN; EIGENES BILD; MATERIAL ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ.....	67
ABBILDUNG 30: FLAMME UMSCHLIEßT EIN IN KOCHSALZ GETRÄNKTES TUCH IM LICHT EINER NATRIUMDAMPFLAMPE; EIGENES BILD; NATRIUMDAMPFLAMPE ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ	69
ABBILDUNG 31: SCHATTEN EINER FLAMME IM MONOCHROMATISCHEN LICHT EINER NATRIUMDAMPFLAMPE; EIGENES BILD; NATRIUMDAMPFLAMPE ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ	69

ABBILDUNG 32: SPRENGEN EINES GUSSEISENSPLINTS DURCH THERMISCHE KONTRAKTION; EIGENES BILD; MATERIAL ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ	71
ABBILDUNG 33: DIE KERZE IM GLAS; EIGENES BILD	72
ABBILDUNG 34: FUNKENSCHLAG DURCH FEUERSTAHL; EIGENES BILD	74
ABBILDUNG 35: HERSTELLUNG VON HOLZKOHLE; EIGENES BILD	75
ABBILDUNG 36: HERSTELLUNG VON HOLZGAS IN EINEM HOLZFEUER; EIGENES BILD.....	77
ABBILDUNG 37: KERZENSCHAUKELE; EIGENES BILD	79
ABBILDUNG 38: MINI-SCHMIEDE MIT ANGEFEUERTEN KOHLEN; EIGENES BILD.....	80
ABBILDUNG 39: DIMENSIONIERUNGSVORSCHLAG FÜR DIE KONSTRUKTION DER MINI-SCHMIEDE; EIGENE GRAFIK.....	80
ABBILDUNG 40: ZWEITER ARBEITSSCHRITT DER KONSTRUKTION DER MINI-SCHMIEDE; EIGENE GRAFIK.....	81
ABBILDUNG 41: DRITTER ARBEITSSCHRITT DER KONSTRUKTION DER MINI-SCHMIEDE; EIGENE GRAFIK	81
ABBILDUNG 42: STAUBEXPLOSION; EIGENES BILD; MATERIAL ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ.....	83
ABBILDUNG 43: KONG MING LATERNE; EIGENES BILD	84
ABBILDUNG 44: MAGNETISCHE KERZENFLAMME; EIGENS BILD	85
ABBILDUNG 45: TABELLE: SUSZEPTIBILITÄT DER BETROFFENEN GASE; EIGENE GRAFIK VGL. [(28), S. 306].....	86
ABBILDUNG 46: FUNKENENTLADUNG DURCH TRANSFORMIEREN DER NETZSPANNUNG; EIGENES BILD; MATERIAL ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ	87
ABBILDUNG 47: PRINZIPSCHALTBILD DES EXPERIMENTS ZUR FUNKENENTLADUNG; [(29), ABBILDUNG 5843]; GERÄT DER FIRMA LEYBOLD ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ	88
ABBILDUNG 48: SCHEMATISCHER AUFBAU DES EXPERIMENTS; VGL. [(30), S. 76, ABBILDUNG 2.62]	89
ABBILDUNG 49: DURCH THERMOELEKTRIZITÄT INDUZIERTES MAGNETFELD; EIGENES BILD; MATERIAL ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ	89
ABBILDUNG 50: ERHITZUNG DES SPEZIALZYLINDERS ZUR DEMONSTRATION DER SCHWARZKÖRPERSTRAHLUNG; EIGENES BILD; SPEZIALZYLINDER ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ	91
ABBILDUNG 51: VERGLEICH DES ZYLINDERS IM ERHITZTEN ZUSTAND (LINKS) UND IM KALTEN ZUSTAND (RECHTS); EIGENES BILD; SPEZIALZYLINDER ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ	91
ABBILDUNG 52: ERZEUGUNG VON PLASMA IN DER MIKROWELLE; EIGENES BILD	93
ABBILDUNG 53: DER FLASCHENGEIST; EIGENES BILD.....	95
ABBILDUNG 54: WÄRMELEITUNGSVERLAUF VERSCHIEDENER METALLE; EIGENES BILD; KONZEPTION DES AUFBAUS VON AO. UNIV.- PROF. DIPL.-ING. DR. TECHN. GERNOT POTTLACHER; ZUR VERFÜGUNG GESTELLT VON DER TU GRAZ.....	96
ABBILDUNG 55: WASSERLINSE; EIGENES BILD	97
ABBILDUNG 56: ERSTICKEN EINER KERZENFLAMME MIT KOHLENSTOFFDIOXID; EIGENES BILD.....	98
ABBILDUNG 57: ZÜNDUNG EINER STREICHHOLZRAKETE; EIGENES BILD	100
ABBILDUNG 58: FLUG EINER STREICHHOLZRAKETE; EIGENES BILD	100
ABBILDUNG 59: KONSTRUKTION EINER STREICHHOLZRAKETE; EIGENES BILD	100
ABBILDUNG 60: BUTTERKERZE; EIGENES BILD.....	102
ABBILDUNG 61: FESTKLEBENDER NAPALMBRAND; EIGENES BILD.....	103
ABBILDUNG 62: ENTNEHMEN DER SPINDEL NACH DEM BOHREN; EIGENES BILD	105
ABBILDUNG 63: ENTZÜNDEN DES VERKOHLTEN HOLZABRIEBS; EIGENES BILD	105

ABBILDUNG 64: MAGNETISCHES STREICHHOLZ; EIGENES BILD	107
ABBILDUNG 65: BRENNENDER GELDSCHEIN; EIGENES BILD	108

6 Literatur

1. GOUDSBLOM, J. *Feuer und Zivilisation*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer VS, 2016. ISBN 3658065052.
2. DEMTRÖDER, W. *Experimentalphysik 3. Atome, Moleküle und Festkörper ; mit 48 Tabellen*. 3., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. Springer-Lehrbuch. ISBN 9783540214731.
3. KIRCHER, E., R. GIRWIDZ und P. HÄUßLER. *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. Springer-Lehrbuch. ISBN 9783540340898.
4. WIESNER, H., H. SCHECKER und M. HOPF, Hg. *Physikdidaktik kompakt*. 3. Auflage. Seelze: Aulis Verlag, 2017. ISBN 9783761427842.
5. BUNDEMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG. *Lehrpläne der AHS Unterstufe* [online] [Zugriff am: 16. Januar 2019]. Verfügbar unter: https://bildung.bmbwf.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp_ahs_unterstufe.html
6. BUNDEMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG. *Lehrplan für den Unterrichtsgegenstand Physik in der AHS/NMS Unterstufe*.
7. BUNDEMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG. *Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne – allgemeinbildende höhere Schulen*.
8. BUNDEMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT UND FORSCHUNG. *Gesamte Rechtsvorschrift für Lehrpläne der Höheren technischen und gewerblichen Lehranstalten*.
9. BROWN, T.L., H.E. LEMAY, B.E. BURSTEN und C. ROBL. *Chemie. Studieren kompakt*. 10., aktualisierte Aufl. München: Pearson, 2011. che - Chemie. ISBN 9783868941227.
10. DEMTRÖDER, W. *Experimentalphysik 1*. Vierte, neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. Springer-Lehrbuch. ISBN 9783540260349.
11. SCHMIDT-ROHR, K. Why Combustions Are Always Exothermic, Yielding About 418 kJ per Mole of O₂ [online]. *Journal of Chemical Education*, 2015, **92**(12), 2094-2099. ISSN 0021-9584. Verfügbar unter: doi:10.1021/acs.jchemed.5b00333

12. SPRINGBORG, M. *Einführung in die Physikalische Chemie*. Berlin: de Gruyter, 2016. De Gruyter Studium. ISBN 9783110408935.
13. HEINTZ, A. *Thermodynamik. Grundlagen und Anwendungen*. 2. Auflage. Berlin: Springer Spektrum, 2017. Lehrbuch. ISBN 9783662499221.
14. WARNATZ, J., U. MAAS und R.W. DIBBLE. *Verbrennung. Physikalisch-chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung ; mit 17 Tabellen*. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin u.a.: Springer, 2001. ISBN 978-3-642-62658-6.
15. TIPLER, P.A., G. MOSCA und J. WAGNER. *Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure*. 7. Aufl. 2015. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN 9783642541667.
16. MERSCHBACHER, A. *Brandschutzfibel*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. ISBN 9783658211387.
17. WELSCH, N., J. SCHWAB und C.C. LIEBMANN. *Materie. Erde, Wasser, Luft und Feuer*. Dordrecht: Springer, 2013. ISBN 9783827418883.
18. STROTH, U. *Plasmaphysik. Phänomene, Grundlagen, Anwendungen*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011. ISBN 9783834816153.
19. JOB, G. und R. RÜFFLER. *Physikalische Chemie. Eine Einführung nach neuem Konzept mit zahlreichen Experimenten*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011. ISBN 9783835100404.
20. WEAST, R.C., Hg. *CRC handbook of chemistry and physics. A ready-reference book of chemical and physical data*. 60. ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1979.
21. HALLIDAY, D., R. RESNICK, J. WALKER und S.W. KOCH. *Halliday Physik*. 2., überarb. und erg. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 9783527407460.
22. WIKIPEDIA. *Feuerstahl* [online] [Zugriff am: 13. März 2019]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Feuerstahl>
23. SPEKTRUM.DE. *Holzkohle* [online]. 11 März 2019, 12:00. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/holzkohle/4158>

24. KALTSCHMITT, M., H. HARTMANN und H. HOFBAUER, Hg. *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2016. ISBN 9783662474389.
25. ZUSAMMENSETZUNG. *Chemische Eigenschaften von Holz - Pyrolyse* [online]. 13 März 2019, 12:00. Verfügbar unter:
https://web.archive.org/web/20160222060814/http://www.scheffel.og.bw.schule.de/facecher/science/nwt/Holz_Chemie_Pyrolyse_Website.pdf
26. IPH INSTITUT FÜR INTEGRIERTE PRODUKTION HANNOVER. *Warmumformung als Verfahren der Umformtechnik* [online]. 16 März 2019, 12:00. Verfügbar unter:
<https://www.iph-hannover.de/de/information/umformtechnik/warmumformung/>
27. VERORDNUNG DES BUNDESMINISTERS FÜR ARBEIT, SOZIALES UND KONSUMENTENSCHUTZ. *Wunschlaternenverordnung*, 9. Dezember 2009.
28. HANS J. SCHLICHTING. Die magnetische Kerzenflamme. *Physik in unserer Zeit*, 2017, (48), 305-306.
29. LP GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT GÖTTINGEN. *Hochtransformieren - Funkenentladung bei einem Hörnerblitzableiter* [online] [Zugriff am: 17. März 2019]. Verfügbar unter:
<https://lp.uni-goettingen.de/get/text/363>
30. DEMTRÖDER, W. *Experimentalphysik 2. Elektrizität und Optik*. 6., überarb. u. akt. Aufl. 2013. Berlin: Springer, 2013. Springer-Lehrbuch. ISBN 9783642299438.
31. KAUFMANN, M. *Plasmaphysik und Fusionsforschung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
32. HEADQUARTERS DEPARTMENT OF THE ARMY. *Unconventional Warfare Devices and Techniques INCENDIARIES*. Washington, D.C., 20. Mai 1966.
33. HANS J. SCHLICHTING. *Magnetische Taschenspielertricks* [online] [Zugriff am: 16. März 2019]. Verfügbar unter: <https://hjschlichting.wordpress.com/2009/10/07/magnetische-taschenspielertricks/>