

Stefan Stangl

Demonstrations- und
Freihandexperimente zur
Thermodynamik

Diplomarbeit

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

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

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

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

Datum:

Unterschrift:

DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich sowohl im Laufe meines Studiums als auch in jeglichen Entscheidungen meines Lebens immer unterstützt haben.

Ebenfalls bedanken möchte ich bei Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher, ohne dessen hervorragende Betreuung, Zeit und der von ihm zur Verfügung gestellten Geräte und Räumlichkeiten diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei meinen Freunden bedanken, die mir die Zeit meines Studiums unvergesslich gemacht haben.

DEMONSTRATIONSEXPERIMENTE

ZUR THERMODYNAMIK

vorgelegt von Stefan Stangl

Fachbereich: Experimentalphysik I

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

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Aufbau, die Durchführung und die zugrundeliegenden physikalischen Prozesse von Experimenten im Fachbereich der Thermodynamik zu beschreiben und zu erklären. Die dafür ausgewählten Themen geben einen Überblick über die Thermodynamik und decken sich zu einem großen Teil auch mit den im AHS-Lehrplan vorgesehenen Schwerpunkten für den Physikunterricht. Die Vorgehensweise, welche zur Erarbeitung der Themen gewählt wurde, sieht eine theoretische Einführung in das jeweilige Kapitel und einen anschließenden experimentellen Teil zur Veranschaulichung der Thematik vor. Es wurden insgesamt 43 Experimente, aufgeteilt auf die einzelnen Kapitel, durchgeführt und in einer Art und Weise dokumentiert, die es jeder Leserin bzw. jedem Leser ermöglicht, die jeweiligen Experimente sowohl in deren Aufbau als auch deren zugrundeliegende Phänomene nachvollziehen zu können. 35 der durchgeführten Experimente wurden auf Video aufgezeichnet und auf einen YouTube-Kanal hochgeladen.

Über diesen fachlichen Schwerpunkt hinausgehend wird auch der fachdidaktische Aspekt und die Rolle von Demonstrationsexperimenten im Physikunterricht betrachtet. Dabei stehen die Funktionen des Experiments im Unterricht, die Forderungen des Lehrplans, die Gegenüberstellung von Schüler- und Demonstrationsexperimenten sowie die Auswirkungen von Experimenten auf den Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler im Vordergrund.

DEMONSTRATION EXPERIMENTS IN THERMODYNAMICS

by Stefan Stangl

subject area: experimental physics I

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

The focus of this thesis is to describe and explain the setup, the performance and the basic physical principles of experiments in the field of thermodynamics. The topics chosen give an overview on the subject and correlate for the most part with the topics provided in the curriculum for high-school physics lessons. The approach chosen to develop said topics was to provide a theoretical foundation of the topic first and then give examples via experiments to illustrate the subject matter. Overall 43 experiments, distributed on the various topics, have been conducted and have been documented in such a way, that the reader can comprehend the experiments in their setup as well as their underlying phenomena. 35 of the conducted experiments have been recorded on video and have been uploaded to a YouTube channel.

In addition to the subject-specific focus of the thesis, the teaching methodology and the function of experiments in physics lessons are evaluated. The main topics in this section include the role of the experiment in the class, the expectations of the curriculum, the comparison of student experiments to demonstration experiments as well as the influence of experiments on the learning process of the students.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
2. Fachdidaktik	2
2.1 Das Experiment im Physikunterricht	2
2.2 Funktionen von Experimenten	3
2.3 Auswirkungen auf den Lernzuwachs	4
2.4 Schülerexperiment - Demonstrationsexperiment	5
2.5 Forderungen des Lehrplans	7
2.5.1 Forderungen des Lehrplans für die AHS-Unterstufe	7
2.5.2 Forderungen des Lehrplan für die AHS-Oberstufe	9
3. Theorie und Experimente	11
3.1 Temperatur	11
3.1.1 Temperatur und thermische Bewegung	11
3.1.2 Temperaturmessung	12
3.1.3 Temperaturskalen	13
3.1.4 Neudefinition des Kelvin	14
3.1.5 Thermische Ausdehnung	15
Experiment 1: Längenausdehnung durch Wärmezufuhr („Bimetallstreifen“)	17
Experiment 2: Volumsausdehnung einer Eisenkugel unter Wärmezufuhr	18
Experiment 3: Volumsausdehnung einer Flüssigkeit unter Wärmezufuhr	19
Experiment 4: Volumsausdehnung von Luft unter Wärmezufuhr	20
3.2 Wärme	21
3.2.1 Wärme und Wärmeenergie	21
3.2.2 Innere Energie	21
3.2.3 Mechanisches Wärmeäquivalent	22
Experiment 5: Mechanisches Wärmeäquivalent	23

3.3 Wärmekapazität	24
3.3.1 Spezifische Wärmekapazität	24
3.3.2 Kalorimetrie	25
Experiment 6: Wärmekapazität eines Kalorimeters und eines Probekörpers	26
Experiment 7: Der nicht platzende Ballon	28
3.4 Der erste Hauptsatz der Wärmelehre	29
3.5 Kinetische Gastheorie	29
3.5.1 Das Modell des idealen Gases	29
3.5.2 Die Zustandsgleichung des idealen Gases	30
3.5.3 Isochore Zustandsänderung	31
3.5.4 Isotherme Zustandsänderung	32
3.5.5 Isobare Zustandsänderung	33
3.5.6 Adiabatische Zustandsänderung	34
Experiment 8: Isochore Zustandsveränderung: „The Dancing Coin“	35
Experiment 9: Isochore Zustandsänderung: Flaschenimplosion	36
Experiment 10: Isotherme Zustandsänderung	37
Experiment 11: Isobare und isochore Zustandsänderung	38
Experiment 12: Adiabatische Kompression („Das pneumatische Feuerzeug“)	39
Experiment 13: Adiabatische Expansion („Nebel in der Flasche“)	40
Experiment 14: Dosenimplosion	41
3.6 Wärmetransport	42
3.6.1 Wärmeleitung	42
3.6.2 Wärmeübergang	43
3.6.3 Wärmedurchgang	43
3.6.4 Wärmeströmung	44
3.6.5 Wärmestrahlung	45
Experiment 15: Wärmeleitung („Die unterbrochene Flamme“)	48
Experiment 16: Wärmeleitung unterschiedlicher Materialien	49

Experiment 17: Wärmeleitung verschiedener Drähte	50
Experiment 18: Geringe Wärmeleitfähigkeit von Wasser	52
Experiment 19: Konvektion von Luft	53
Experiment 20: Wärmeströmung einer Flüssigkeit.....	54
Experiment 21: Wärmestrahlung - Hohlspiegel.....	55
Experiment 22: Wärmestrahlung – Leslie-Würfel	56
Experiment 23: Wärmestrahlung auf unterschiedliche Oberflächen	57
Experiment 24: Wien'sches Verschiebungsgesetz.....	58
3.7 Entropie und der zweite Hauptsatz der Wärmelehre	59
3.7.1 Reversible und irreversible Prozesse	59
3.7.2 Die Entropie	59
3.7.3 Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre	61
3.8 Der dritte Hauptsatz der Wärmelehre	61
Experiment 25: Veranschaulichung der Entropie	62
3.9 Phasenübergänge	63
3.9.1 Aggregatzustände.....	63
3.9.2 Phasenübergänge und latente Wärme	63
3.9.3 Das Phasendiagramm.....	65
3.9.4 Verdunsten	67
3.9.5 Verdampfungsenergie und die Clausius-Clapeyron Gleichung.....	67
3.9.6 Dampfdruck und Sieden	68
Experiment 26: Anomalie des Wassers.....	70
Experiment 27: Unterschichten von Wasser	71
Experiment 28: Anomalie des Wassers: Ausdehnung beim Gefrieren	72
Experiment 29: Resublimation und flüssiger Sauerstoff.....	73
Experiment 30: Gefrieren durch Verdampfen.....	74
Experiment 31: Sublimation von CO ₂	76
Experiment 32: Festes Argon	77

Experiment 33: Verdampfungswärme – Spiritus und Watte	78
Experiment 34: Verdampfungswärme - Schwitzen.....	79
Experiment 35: Schmelzwärme - Wärmepad.....	80
Experiment 36: Dampfdruck	81
3.10 Leidenfrost-Effekt	82
Experiment 37: Leidenfrost-Effekt: Stahlkugel	83
Experiment 38: Leidenfrost-Effekt: Heiße Herdplatte.....	84
Experiment 39: „Inverser Leidenfrost-Effekt“	85
3.11 Thermospannung und Thermoelemente	86
3.11.1 Der Seebeck-Effekt.....	86
Experiment 40: Thermoelement.....	87
3.12 Diffusion.....	88
Experiment 41: Thermische Bewegung („Diffusion von Tinte“)	89
Experiment 42: Diffusion von Helium.....	90
3.13 Viskosität von Gasen.....	92
Experiment 43: Innere Reibung eines Gases.....	93
4. Abbildungsverzeichnis.....	94
5. Literaturverzeichnis.....	97

1. EINLEITUNG

Die Thermodynamik ist eines der umfangreichsten und bedeutsamsten Fachbereiche der Physik. Viele bekannte Physiker wie Ludwig Boltzmann, Max Planck oder Albert Einstein befassten sich in ihrer Lebzeit mit diesem Fachbereich und trugen wesentlich zu seiner Erforschung bei. Im Rahmen meines Studiums beschäftigte ich mich mit dieser Thematik im Rahmen der Lehrveranstaltungen *Experimentalphysik 1* und *Schulversuche 2*.

Da mir schon als Schüler Experimente im Physikunterricht sehr viel Spaß machten und darüber hinaus halfen, die zugrundeliegende Theorie der Vorgänge hinter den Experimenten zu verstehen, wollte ich mir in meiner Laufbahn als Lehrer ein Repertoire an Experimenten aneignen, um diese meinen zukünftigen Schülerinnen und Schülern zeigen zu können. Als Grundstein für dieses Repertoire dient diese Diplomarbeit.

Das zentrale Thema dieser Diplomarbeit stellen Demonstrationsexperimente zum Thema Thermodynamik dar. Dazu wurden schulrelevante Kapitel der Thermodynamik theoretisch erarbeitet und die essentiellen Sachverhalte mit Hilfe von Experimenten veranschaulicht. Die Experimente wurden sowohl in ihrem Aufbau und in ihrer Durchführung beschrieben als auch mit der zugrundeliegenden Theorie in Verbindung gebracht, größtenteils auf Video aufgezeichnet und auf einen YouTube-Kanal hochgeladen.

Im Rahmen der Arbeit wurde darüber hinaus noch auf den fachdidaktischen Aspekt von Experimenten und deren Einsatz im Physikunterricht eingegangen. Dabei wurde auf die Funktionen des Experiments im Unterricht, die Forderungen des Lehrplans, die Gegenüberstellung von Schüler- und Demonstrationsexperimenten und die Auswirkungen von Experimenten auf den Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler eingegangen.

2. FACHDIDAKTIK

2.1 Das Experiment im Physikunterricht

Experimente spielen in der Physik sowohl in der Forschung als auch im schulischen Kontext eine bedeutende Rolle. Während sie in der Forschung der Überprüfung von neuen Theorien dienen, werden sie im Unterricht hauptsächlich zur Unterstützung des Lehrens und Lernens eingesetzt. *(Wiesner, Schecker, & Hopf, 2018, S. 106)*

In der naturwissenschaftlichen Forschung ist Experimentieren hypothesengesteuert und ist in der Regel ergebnisoffen und soll zu neuen Erkenntnissen in der jeweiligen Naturwissenschaft führen. Experimente im Schulunterricht hingegen, liefern keine neuen Erkenntnisse im Rahmen der Naturwissenschaft, sondern sollen zu neuen Erkenntnissen der Schülerinnen und Schüler führen. *(Winkelmann & Erb, 2018, S. 21)*

Die Rolle von Experimenten im Schulunterricht ist es, Phänomene zu zeigen und dadurch fachliche Fragestellungen in den Betrachtungshorizont der Schülerinnen und Schüler zu rücken. Ebenso wichtig ist die Funktion des Experiments, naturwissenschaftliche Arbeitsweisen zu vermitteln. Hierbei stehen vor allem die Planung, die Durchführung, die Beobachtung, die Analyse sowie die Bewertung und die Präsentation im Vordergrund. Der Unterricht soll deutlich machen, auf welche Weise in der naturwissenschaftlichen Praxis Erkenntnisse gewonnen werden und welche Rolle das Experiment als Bindeglied zwischen Theorie und Praxis einnimmt. *(Kircher, Girwidz, & Häußler, 2009, S. 245)*

Aus mediendidaktischer Sicht dient das Experiment darüber hinaus auch als wichtiger Informationsträger und kann eine tragende Mitteilungsfunktion übernehmen. Grund dafür ist vorrangig, dass sich viele Phänomene sowie physikalische Effekte durch ein Experiment deutlich besser vorausschließen lassen, als es eine verbale Erklärung könnte. *(Kircher, Girwidz, & Häußler, 2009, S. 245)*

Nutzen und Wirkung von Experimenten im Schulunterricht lassen sich jedoch nicht isoliert von den Zielen, die der Unterricht verfolgt, betrachten. Im folgenden Abschnitt wird deshalb der Beitrag des Experiments im Bezug auf die jeweilige Zielsetzung des Unterrichts behandelt. *(Kircher, Girwidz, & Häußler, 2009, S. 245)*

2.2 Funktionen von Experimenten

Eine der Aufgaben von Experimenten im Unterricht ist es, Überraschungseffekte bzw. Phänomene zu zeigen, die für die Lernenden motivierenden Charakter haben. Dies ist jedoch nicht die Hauptaufgabe eines Experiments. Diese liegt darin, das Lernen der Schülerinnen und Schüler zu unterstützen. Je nachdem welches Ziel der Unterricht verfolgt, muss die Lehrkraft überlegen, welche Experimente das Erreichen dieses Ziels begünstigen können. Dabei ist das Unterrichtsziel ausschlaggebend dafür, welche Funktion das Experiment erfüllen muss (siehe Tabelle 1). (Wiesner, Schecker, & Hopf, 2018, S. 106-107)

Ziel des Physikunterrichts	Beitrag des Unterrichtsexperiments
Vermittlung von Fachwissen	<ul style="list-style-type: none"> - Überzeugende Darstellung eines Phänomens - Veranschaulichung eines Konzepts - Überprüfung physikalischer Gesetze
Begriffswechsel	<ul style="list-style-type: none"> - Erzeugung eines kognitiven Konflikts - plausibles Argument für eine Neuvorstellung
Naturwissenschaftliches Arbeiten	<ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung von Fragestellungen und Hypothesen - Versuchsplanung und -durchführung - Auswerten von Daten - kritischer Umgang mit Versuchsergebnissen und deren Verallgemeinerung - Erwerb experimenteller Fähigkeiten
Kommunizieren über Physik	<ul style="list-style-type: none"> - Dokumentation von Versuchen und Daten - Gegenüberstellung und Diskussion unterschiedlicher Ergebnisse und Schlussfolgerungen
Lernen über die Natur der Naturwissenschaften	<ul style="list-style-type: none"> - Anlass zur Diskussion über Wissensentstehung in der Naturwissenschaft
Interesse anregen	<ul style="list-style-type: none"> - Alltagsbezüge aufzeigen - Forschungsexperimente veranschaulichen - Aufmerksamkeit erregen, zum Staunen bringen, unterhalten

Tabelle 1: Beitrag des Unterrichtsexperiments zu verschiedenen Zielen (Wiesner, Schecker, & Hopf, 2018, S. 107)

2.3 Auswirkungen auf den Lernzuwachs

Der Einsatz von Experimenten wird in der Fachdidaktik seit jeher gefordert. Umso erstaunlicher ist es, dass das Experimentieren alleine keine Auswirkungen auf den Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler hat. Gründe dafür liegen zum Beispiel in der Individualität jeder Schülerin bzw. jedes Schülers. Bei einem Experiment, das die Schülerinnen und Schüler beobachten sollen, kann die Lehrkraft nicht davon ausgehen, dass jeder Lernende dasselbe wahrnimmt. Individuelle Erwartungshaltungen und Vorwissen beeinflussen die Rezeption des Experiments in großem Ausmaß. Um ein Experiment lernwirksam in den Unterricht zu integrieren ist eine sorgfältige Vorbereitung und Hinführung der Schülerinnen und Schüler unabdingbar. Jeder Lernende muss im Vorhinein genau wissen, wozu das Experiment dient, welche Ergebnisse es geben könnte, worauf sie zu achten haben usw. Des Weiteren muss die Erwartung an den Ausgang des Experiments im Vorfeld abgeklärt werden. Ebenso wichtig wie die Vorbereitung, ist die Nachbereitung des Experiments. Im Rahmen dieser sollen Fragen nach dem Ausgang des Experiments, der Beobachtungen der Lernenden, der zu ziehenden Schlüsse, anschließende Fragen usw. behandelt werden. Die nachgewiesene begrenzte Lernwirksamkeit von Experimenten kann man unter anderem auf eine schwache Vor- bzw. Nachbereitung zurückführen. (Wiesner, Schecker, & Hopf, 2018, S. 111-112)

Unter anderem wird dieses Problem in einer von Maike Tesch und Reinders Duit im Jahr 2004 durchgeführten Studie thematisiert. Sie betrachteten Unterrichtsphasen im Physikunterricht in denen Experimente eingesetzt wurden. In der Untersuchung zeigte sich, dass sich die gesamte Unterrichtszeit, die für das Experimentieren aufgebracht wurde (inkl. Vor- und Nachbereitungen) positiv auf die Leistungsentwicklung der Schülerinnen und Schüler ausgewirkt hatte, jedoch nicht die reine Experimentierzeit. Für Tesch und Reinders ist dies ein Indiz, dass die Einbettung von Experimenten in den Unterricht ein wichtiger Qualitätsfaktor für den Physikunterricht ist. Sie weisen aber auch darauf hin, dass es bei der Wahl des Experimentierens als Unterrichtsmethode zu beachten gilt, welche Funktionen das Experiment im Unterricht und im Lernprozess einnehmen soll und wie das Experiment zur Erreichung des Unterrichtsziels beitragen soll. (Tesch & Duit, 2004, S. 66)

Eine Studie, die 2017 von Laura Muth und Roger Erb durchgeführt wurde, untersuchte die Auswirkungen der Auswertungsphase beim Experimentieren auf den Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler. Die Lernenden wurden dabei in drei Treatment-Gruppen unterteilt:

- a) Plenum: Die Auswertung des Experiments wurde von der Lehrkraft angeleitet.
- b) Angeleitet: Die Auswertung des Experiments erfolgte in Schülerkleingruppen. Das Vorgehen zur Auswertung war mit Hilfe von Arbeitsblättern vorskizziert. Die Lehrkraft sollte nur im Notfall als Helfer zur Verfügung stehen.
- c) Selbstständig: Die Auswertung des Experiments erfolgte in Schülerkleingruppen. Allerdings gab es dabei keine Vorgaben zum Vorgehen. Zur Hilfe standen das Schulbuch, das Internet etc. zur Verfügung. Die Lehrkraft sollte nicht einwirken.

In Folge der Studie konnte eine Steigerung des Fachwissens und der Auswertekompetenz der Schülerinnen und Schülern in allen drei Treatment-Gruppen nachgewiesen werden, die am stärksten in der von der Lehrkraft geleiteten Auswertung zu erkennen war. (*Muth & Erb, 2017, S. 142-143*)

Experimentieren alleine fördert das Lernen also nicht. Um Experimente im Physikunterricht lernwirksam einzusetzen, ist es entscheidend, wie die Experimente in den Unterricht eingebettet sind. Hier spielen die Vorbereitung des Experiments im Hinblick auf die Hinführung der Schülerinnen und Schüler zu dem Experiment, als auch die Auswertung des Experiments in weiterer Folge eine entscheidende Rolle. Der Fokus für angehende Lehrkräfte sollte schlussendlich nicht allein auf dem Experiment liegen, sondern vielmehr in der Auswertung, Diskussion und Vorbereitung des Experiments.

2.4 Schülerexperiment - Demonstrationsexperiment

Von Seiten der Politik und den Medien hört man immer öfter einen Aufruf, mehr Schülerexperimente im naturwissenschaftlichen Unterricht einzubauen, da diese besser für das Verständnis und das Fördern von Interesse der Schülerinnen und Schüler geeignet wären, als die reine Demonstration eines Experiments. In diesem Abschnitt wird eine Studie vorgestellt, die sich dieser Thematik widmete und eine mögliche Antwort darauf liefern könnte, ob es tatsächlich einen Unterschied zwischen den beiden Formen des Experiments im Hinblick auf physikalisches Verständnis und das Interesse zum Fach gibt, der groß genug ist, um den Einsatz von Schülerexperimenten dem Einsatz eines Demonstrationsexperiments vorzuziehen.

In einer Studie von Jan Winkelmann und Roger Erb, die 2017 bis 2018 durchgeführt wurde, wurde der Einfluss von Schüler- und Demonstrationsexperimenten auf den Lernzuwachs und

das Interesse der Schülerinnen und Schüler am Fach Physik untersucht. Sie untersuchten im Rahmen der Studie 1032 Schülerinnen und Schüler der siebten Jahrgangsstufe aus Deutschland. Diese wurden in drei Versuchsgruppen eingeteilt: (*Winkelmann & Erb, 2018, S. 26*)

- a) Die Lehrkraft oder einzelne Schülerinnen oder Schüler demonstrierten ein Experiment vor der gesamten Klasse.
- b) Die Schülerinnen und Schüler führten eigenständig Experimente in Kleingruppen durch und erhielten hierfür detaillierte Instruktionen. Diese Anleitungen wurden in geschriebener Form den Schülerinnen und Schülern zur Verfügung gestellt.
- c) Die Schülerinnen und Schüler führten eigenständig Experimente in Kleingruppen durch und erhielten hierfür offene Instruktionen. Diese waren nicht auf ein Minimum beschränkt, aber weniger ausgearbeitet als in Gruppe B. Eine Problemsituation wurde benannt und die zur Verfügung gestellten Materialien aufgelistet. Der Aufbau des Experiments und ggf. das Formulieren von Hypothesen musste selbstständig geleistet werden.

Die Studien ergab für den Lernzuwachs der Schülerinnen und Schüler in allen drei Versuchsgruppen hochsignifikante Ergebnisse. Es zeigte sich für alle drei Gruppen ein sehr ähnlicher Mittelwert. (*Winkelmann & Erb, 2018, S. 29*)

Größere Unterschiede im Lernzuwachs konnten in leistungsschwächeren Gruppen beobachtet werden. Hier zeigte sich, dass leistungsschwächere Schülerinnen und Schüler bei dem Demonstrationsexperiment und bei dem Schülerexperimenten mit detaillierten Instruktionen (Gruppen a) und b)) den stärksten Leistungszuwachs erhielten, während die Gruppe c), die ein offen gestelltes Problem in Kleingruppen bearbeiten sollten, den geringsten Lernzuwachs zu verzeichnen hatten. (*Winkelmann & Erb, 2018, S. 30*)

Im Hinblick auf das Interesse am Fach ergab sich in allen drei Versuchsgruppen ein leichter Zuwachs, der bei den Gruppen b) und c), also den Gruppen, welche Schülerexperimente durchführten, etwas größer ausfiel, als bei Gruppe a). (*Winkelmann & Erb, 2018, S. 30*)

Zusammenfassend ergab die Studie, dass die Hypothese, dass Schülerexperimente einen größeren Lernzuwachs und größeres Interesse am Fach hervorrufen würden als ein Demonstrationsexperiment, nicht bestätigt werden konnte. Des Weiteren sehen Winkelmann und

Erb die Ergebnisse der Studie als einen Beleg dafür, dass eine Art des Experimentierens der anderen nicht vorzuziehen ist, was wiederum für das Nutzen einer Vielfalt an Unterrichtssituationen spricht. (*Winkelmann & Erb, 2018, S. 30-31*)

2.5 Forderungen des Lehrplans

In diesem Abschnitt wird auf die Anforderungen des Lehrplans im Unterrichtsfach Physik der allgemeinbildenden höheren Schulen eingegangen. Speziell werden jene Anforderungen herausgearbeitet, die durch den Einsatz von Experimenten im Unterricht realisierbar sind. Es wird hierbei eine Unterteilung in Unter- und Oberstufenlehrplan vorgenommen. Die beiden folgenden Abschnitte sind Exzerpte aus den AHS-Lehrplänen für das Unterrichtsfach Physik der Unter- und Oberstufe. Zu finden sind diese unter folgenden Links:

Lehrplan für die AHS-Unterstufe:

https://bildung.bmbwf.gv.at/schulen/unterricht/lp/ahs16_791.pdf?61ebzq

Lehrplan für die AHS-Oberstufe:

https://bildung.bmbwf.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp_neu_ahs_10_11862.pdf?61ebyx

2.5.1 Forderungen des Lehrplans für die AHS-Unterstufe

Bildungs- und Lehraufgabe

Ausgehend von fachspezifischen Aspekten wird die enge Verflechtung der Physik mit anderen Naturwissenschaften bearbeitet: Der Unterrichtsgegenstand trägt zu allen Bildungsbereichen bei und soll sich keinesfalls nur auf die Darstellung physikalischer Inhalte beschränken. 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.

Beiträge zu den Bildungsbereichen

Sprache und Kommunikation:

Anwendung einer altersadäquaten Fachsprache; Präziser Sprachgebrauch bei Beobachtung, Beschreibung und Protokollierung physikalischer Vorgänge und Planung von Schülerexperimenten.

Kreativität und Gestaltung:

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

Didaktische Grundsätze

- Der Physikunterricht soll zu übergeordneten Begriffen und allgemeinen Einsichten führen, die an Hand weiterer Beispiele auf konkrete Sachverhalte angewendet werden.
- Ausgehend von konkreten Beobachtungen bzw. Alltagserfahrungen der Schülerinnen und Schüler sind unter Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten jeweils die zu Grunde liegenden physikalischen Inhalte zu erarbeiten.
- 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.
- An geeigneten Inhalten ist den Schülerinnen und Schülern Gelegenheit zu möglichst selbstständigem Untersuchen, Entdecken bzw. Forschen zu geben. Dies bedingt den Einsatz von Schülerversuchen.

2.5.2 Forderungen des Lehrplan für die AHS-Oberstufe

Bildungs- und Lehraufgabe

Die Schülerinnen und Schüler sollen eine rationale Weltsicht erwerben, aktiv die spezifische Arbeitsweise der Physik und ihre Bedeutung als Grundlagenwissenschaft erkennen und damit beurteilen lernen, welche Beiträge zu persönlichen und gesellschaftlichen Entscheidungen physikalische Methoden liefern können. Weiters sollen sie die Bedeutung physikalischer Phänomene und Konzepte im Alltag und in der Umwelt und für die Welterkenntnis erfassen und für ihre Lebensgestaltung nutzen. Ziel des Physikunterrichts ist daher die Vermittlung des nötigen Rüstzeuges zum verstehenden Erleben von Vorgängen in Natur und Technik und keinesfalls nur das Informieren über sämtliche Teilgebiete der Physik.

Das Ziel ist der Erwerb folgender Fähigkeiten, Fertigkeiten und Werthaltungen:

- Informationen sammeln, hinterfragen und argumentieren können
- eigene Arbeiten zielgruppengerecht präsentieren können
- eigenständig arbeiten können
- umweltbewusst handeln können-mit Expertinnen und Experten sprechen, Expertenmeinungen hinterfragen und grundlegendes physikalische Zusammenhänge darstellen können
- einfache Experimente planen und durchführen können
- Hypothesen entwickeln, einschätzen und diskutieren können
- Gefahren erkennen, einschätzen und sicherheitsbewusst handeln können

Beiträge zu den Bildungsbereichen:

Natur und Technik

Einsichten in die Ursachen von Naturerscheinungen und daraus abgeleiteten, zugehörigen physikalischen Gesetzmäßigkeiten gewinnen; Kausalitätsdenken und Erkennen der Grenzen der Vorhersagbarkeit auf Grund von praktisch bzw. prinzipiell unvollständigen Systeminformationen entwickeln; Physik als Grundlage der Technik verstehen.

Kreativität und Gestaltung

Hypothesenbildung und Problemlösen als kreative Prozesse verstehen; Prinzipielles über physikalische Grundlagen der Wahrnehmung wissen; Sich mit künstlerischen Umsetzungen physikalischer Konzepte auseinander setzen.

Didaktische Grundsätze

Bei der Wahl der Unterrichtsmethode ist unter anderem das empirische Arbeiten und erfahrungsgelitetes Lernen zu berücksichtigen: Das Zusammenspiel von Beobachtung, Hypothesenbildung und überprüfendem Experimentieren sowie die Formulierung allgemeiner Gesetzmäßigkeiten als physikalische Methode hat in allen Formen des Unterrichts deutlich zu werden.

Die individuell verschiedene Leistungsfähigkeit ist durch differenzierte Aufgabenstellungen zu berücksichtigen. Neben dem kognitiven Bereich sind Handlungsfähigkeit und Problemlösungskompetenz zu berücksichtigen. Geeignet sind dafür beispielsweise Interpretation fachbezogener Medienberichte, Planung, Durchführung, Auswertung und Protokollierung von Experimenten, Fragenformulierung und Hypothesenbildung.

Lehrstoff

Besonders im Lehrstoff der 5. und 6. Klasse wird der Einsatz von Experimenten erwähnt.

Die Schülerinnen und Schüler sollen folgende physikalische Bildungsziele erreichen:

- mittels einfacher Schülerexperimente insbesondere die Fähigkeit zum Beobachten, Beschreiben und Berichten sowie Planen, Durchführen und Auswerten entwickeln.

3. THEORIE UND EXPERIMENTE

3.1 TEMPERATUR

3.1.1 Temperatur und thermische Bewegung

In jedem Körper bewegen sich die Atome bzw. Moleküle zu jeder Zeit. Diese ungeordnete Teilchenbewegung wird *thermische Bewegung* genannt. Sie fällt umso stärker aus, je wärmer ein Körper ist und umso geringer, je kälter er ist. Bei einer Temperatur von 0 K gibt es keine thermische Bewegung mehr.

Robert Brown war der erste, der 1827 die thermische Bewegung indirekt entdeckt hat. Er untersuchte Pollenkörner in Wasser unter einem Mikroskop und beobachtete zitterige Bewegungen der Pollen, obwohl das Wasser, in dem sich die Pollen befanden, ruhig war. Die Ursache für diese sogenannte *Brown'sche Bewegung* konnte erst später (1905) durch Albert Einstein gefunden werden. Der Grund für die Bewegung der Pollen waren Wassermoleküle, die aufgrund ihrer thermischen Bewegung Stöße mit den Pollenkörnern vollzogen und diese dadurch ebenfalls in Bewegung setzten. (Sextl, 2012, S. 10)

Die *Temperatur* eines Körpers ist ein Maß für die mittlere kinetische Teilchen in einem Körper. Diese kinetische Energie setzt sich dabei aus Translationsbewegungen, Schwingungen und Rotationen der einzelnen Atome bzw. Moleküle des Körpers zusammen. Je größer diese kinetische Energie ist, desto wärmer ist der Körper, je kleiner sie ist, desto kälter ist er.

Zusammenhängend mit der thermischen Bewegung kann man alternativ auch sagen, dass die Temperatur eines Körpers ein Maß für die Stärke der thermischen Bewegung seiner Atome bzw. Moleküle ist. (Sextl, 2012, S. 10)

Nicht alle Teilchen eines Körpers haben bei einer bestimmten Temperatur dieselbe kinetische Energie. Vielmehr nähert sich die Verteilung der kinetischen Energien der Teilchen eines Stoffes bei einer bestimmten Temperatur der sogenannten *Maxwell-Boltzmann Verteilung* an, welche in Abbildung 1 schematisch dargestellt ist. Sie zeigt die Abhängigkeit der Anzahl der Teilchen $f(v)$ von der Teilchengeschwindigkeit v .

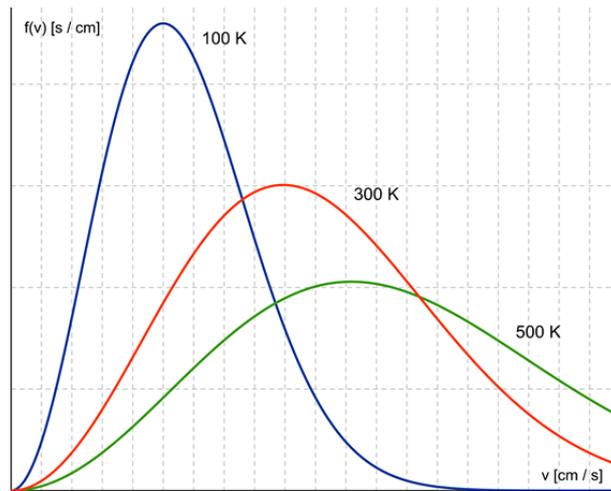


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Maxwell-Boltzmann Verteilung;
<http://strands.de/chemical/46>
 $f(v)$... Teilchenanzahl v ... Geschwindigkeit der Teilchen

Die Maxwell-Boltzmann Verteilung zeigt unter anderem durch ihren Erwartungswert, welche kinetische Energie die meisten Teilchen eines Körpers bei einer gegebenen Temperatur besitzen. Des Weiteren kann man erkennen, dass es für die Teilchen durchaus möglich ist, sowohl größere als auch kleinere kinetische Energien als den Erwartungswert anzunehmen, wobei solche Teilchen seltener anzutreffen sind, als Teilchen, die eine kinetische Energie in der Nähe des Erwartungswertes besitzen. Diese Verteilung der kinetischen Energie ist unter anderem die zugrundeliegende Ursache für Phänomene wie das Verdunsten oder das Sublimieren (siehe Kapitel: *Phasenübergänge*).

3.1.2 Temperaturmessung

Um die Temperatur eines Körpers messen zu können, braucht man ein Gerät, das sogenannte *thermometrische* Eigenschaften besitzt. Eine thermometrische Eigenschaft ist eine physikalische Eigenschaft eines Körpers die unter Temperaturveränderung variiert. Zu diesen Eigenschaften zählen unter anderem: (Tipler & Mosca, 2014, S. 530)

- Volumsausdehnung durch Temperaturerhöhung (bei konstant gehaltenem Druck).
- Druckerhöhung durch Temperaturerhöhung (bei konstant gehaltenem Volumen).
- Erhöhung des elektrischen Widerstands durch Temperaturerhöhung.
- Wellenlängenänderung der Wärmestrahlung bei unterschiedlichen Temperaturen.

Beispiele für Geräte mit den jeweiligen thermometrischen Eigenschaften, die in der Praxis zur Temperaturmessung herangezogen werden, sind:

- Flüssigkeitsthermometer (Volumsausdehnung)
- Bimetallthermometer (Volumsausdehnung)
- Dampfdruckthermometer (Druckerhöhung)
- Infrarotthermometer (Wellenlängenänderung)
- Widerstandsthermometer (elektrische Widerstandsänderung)
- Thermoelemente (thermoelektrischer Effekt)

3.1.3 Temperaturskalen

Um sinnvolle Aussagen über Temperaturänderungen treffen zu können, muss man die Messwerte mit Referenzgrößen in Verbindung setzen. Für die Wahl dieser Referenzgrößen gibt es im Allgemeinen keine Regel, jedoch benötigt man immer zwei Referenzgrößen pro Skala (meist als unterer und oberer Fixpunkt bezeichnet). Die bekanntesten Temperaturskalen und ihre jeweiligen Referenzwerte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Einheit	Unterer Fixpunkt	Oberer Fixpunkt	Zeichen
Grad Celsius	Gefrierpunkt des Wassers (0 °C bei Normaldruck)	Siedepunkt des Wassers (100 °C bei Normaldruck)	°C
Grad Fahrenheit	Temperatur einer Eis, Wasser und Ammoniumchlorid Mischung (-17,8 °C = 0 °F)	Körpertemperatur des Menschen (35,6 °C = 96 °F)	°F
Kelvin	Absoluter Nullpunkt (- 273,15 °C = 0 K)	Tripelpunkt des Wassers (0,01 °C = 273,16 K)	K
Grad Réaumur	Gefrierpunkt des Wassers (0 °C = 0 °Ré bei Normaldruck)	Siedepunkt des Wassers (100 °C = 80 °Ré bei Normaldruck)	°Ré

Tabelle 2: Temperaturskalen im Vergleich;
<https://de.wikipedia.org/wiki/Vorlage:Temperaturskalen>

Eine weitere nennenswerte Temperaturskala wäre die *Rankine Skala* (Grad Rankine oder °Ra). Sie besitzt dieselben Fixpunkte und dieselbe Schrittweite wie die Fahrenheit Skala, jedoch beginnt sie nicht wie die Fahrenheit Skala bei -17,8 °C, sondern bei -273,15 °C (absoluter Nullpunkt). Das bedeutet, dass 0 °Ra = -459,67 °F entspricht. Der Gefrierpunkt des Wassers (32 °F) und der Siedepunkt des Wassers (212 °F) entsprechen 491,67 °Ra bzw. 671,67 °Ra.

3.1.4 Neudefinition des Kelvin

Die Einheit der Temperatur, die in der Physik verwendet wird, ist das Kelvin. Zur Einführung des SI-Systems im Jahre 1960 legte man fest, dass der Tripelpunkt des Wassers bei exakt 273,16 K liegt. Dies entspricht jener Temperatur, bei der (in Abwesenheit von Luft) flüssiges Wasser, festes Wasser (Eis) und Wasserdampf bei einem Druck von $p = 611,657 \text{ Pa}$ im Gleichgewicht sind. Es wurde für diese Definition sogenanntes „Vienna Mean Ocean Water“ benutzt, welches ein bestimmtes Isotopenverhältnis aufweist. Die Temperatur von 273,16 K wurde gewählt, da sie zweckmäßig und hoch reproduzierbar war. Entsprechend wurde das Kelvin als der 273,16te Teil des Wasser-Tripelpunkts definiert. (*Das Kelvin, kein Datum*)

Im Jahr 2014 wurde beschlossen, Messverfahren zu entwickeln, die es erlauben, alle SI-Einheiten mit Hilfe von Naturkonstanten zu definieren. Die oben erwähnte Definition des Kelvins über den Tripelpunkt von Wasser sollte also nun durch eine Definition über eine Naturkonstante ersetzt werden. Die Naturkonstante, die für diese Neudefinition herangezogen wurde, ist die Boltzmann-Konstante. Diese erlaubt es, Temperaturen mit direktem Bezug zur Energie zu definieren. Durch zahlreiche Messungen wurde der Wert der Boltzmann-Konstante auf den fixen Wert $k_B = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ festgelegt, wobei die Einheit $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ gleich der Einheit $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ist. Da im Rahmen der Neudefinition der SI-Größen auch das Kilogramm, das Meter und die Sekunde neudefiniert und auf Naturkonstanten zurückgeführt wurden, ergibt sich für das Kelvin schlussendlich folgende Definition: (*Das Kelvin, kein Datum*)

$$\begin{aligned}
1 \text{ K} &= \left(\frac{1,380\,649 \cdot 10^{-23}}{k_B} \right) \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = \\
&= \frac{1,380\,649 \cdot 10^{-23}}{6,626\,070\,15 \cdot 10^{-32} \cdot 9\,192\,631\,770} \Delta\nu_{Cs} \cdot h \cdot k_B^{-1} = \\
&= 2,266\,665 \dots \Delta\nu_{Cs} \cdot h \cdot k_B^{-1}
\end{aligned} \tag{F.1}$$

K... Kelvin $\Delta\nu_{Cs}$... Übergangsfrequenz der beiden Hyperfeinstrukturen des Grundzustands des ^{133}Cs Atoms (Cäsium-133) [$\Delta\nu_{Cs}$] = s^{-1} h ... Planck'sches Wirkungsquantum [h] = $\text{J} \cdot \text{s}$
 k_B ... Boltzmann-Konstante [k_B] = $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$

(Scharf & Middelmann, 2018)

3.1.5 Thermische Ausdehnung

Wird die Temperatur eines Körpers erhöht, so dehnt er sich im Allgemeinen aus (ein Beispiel wo das nicht der Fall ist, wäre die *Anomalie des Wassers*, welche in einem späteren Kapitel besprochen wird). Betrachtet man nun einen Festkörperstab oder eine Flüssigkeitssäule, so dehnt sich diese bei einer Temperaturerhöhung aus. Die Längenänderung Δl des Stabs oder der Flüssigkeitssäule ist dabei proportional zur Temperaturänderung ΔT . Der Proportionalitätsfaktor α wird dabei als *Längenausdehnungskoeffizient* bezeichnet. Es besteht also der Zusammenhang: (Tipler & Mosca, 2014, S. 535)

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T \tag{F.2}$$

Δl ... Längenausdehnung [Δl] = m α ... Längenausdehnungskoeffizient [α] = K^{-1} l ... Länge des Stabs bzw. der Flüssigkeitssäule [l] = m ΔT ... Temperaturänderung [ΔT] = K

Der Längenausdehnungskoeffizient hängt dabei nur sehr schwach vom Druck ab, kann sich jedoch stark mit der Temperatur ändern. Analog zur Längenausdehnung, kann man die Volumenausdehnung eines Festkörpers, einer Flüssigkeit bzw. eines Gases definieren: (Tipler & Mosca, 2014, S. 535)

$$\Delta V = \varepsilon \cdot V \cdot \Delta T \tag{F.3}$$

ΔV ... Volumsausdehnung [ΔV] = m^3 ε ... Volumsausdehnungskoeffizient [ε] = K^{-1}
 V ... Volumen der Körpers [V] = m^3 ΔT ... Temperaturänderung [ΔT] = K

Auch der Volumsausdehnungskoeffizient hängt nur schwach vom Druck ab, jedoch ist eine mehr oder weniger starke Temperaturabhängigkeit gegeben.

Da der Längenausdehnungskoeffizient nur die Ausdehnung des Körpers in eine Raumrichtung beschreibt, der Volumsausdehnungskoeffizient jedoch in alle drei Raumrichtungen, besteht der Zusammenhang: (Tipler & Mosca, 2014, S. 539)

$$\varepsilon = 3 \cdot \alpha \quad (\text{F.4})$$

ε ... Volumsausdehnungskoeffizient [ε] = K⁻¹ α ... Längenausdehnungskoeffizient [α] = K⁻¹

Der Volumsausdehnungskoeffizient hängt bei den meistens Materialien nicht von der Raumrichtung ab. Das bedeutet, dass sich ein Körper bei Wärmezufuhr in alle Raumrichtungen relativ gesehen gleich weit ausdehnt und er deshalb seine Proportionen beibehält.

Experiment 1: Längenausdehnung durch Wärmezufuhr („Bimetallstreifen“)

Materialien:

- Kerze
- Bimetallstreifen
- Zange oder Haltevorrichtung
- Feuerzeug

Link und QR-Code zum Video:



<https://youtu.be/BapvCFXLv14>



Abbildung 2: Bimetallstreifen unter Wärmezufuhr; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Ein Bimetallstreifen besteht aus zwei unterschiedlichen Metallstreifen, die sich unter Wärmezufuhr unterschiedlich stark ausdehnen. Für die Herstellung eines solchen Bimetallstreifens werden die beiden Metallstreifen miteinander verklebt oder verschweißt. Die Eigenschaften eines Bimetallstreifens kann man sehr leicht anhand eines Versuchs zeigen. Zu allererst befestigt man den Bimetallstreifen in einer Haltevorrichtung und platziert unter diesem eine brennende Kerze. Die Flamme der Kerze sollte dabei so nahe am Bimetallstreifen sein, dass diese ihn fast berührt. Anschließend wartet man etwas und beobachtet das Verhalten des Streifens. Man kann eine deutliche Krümmung des Bimetallstreifens in eine Richtung beobachten.

Physikalischer Hintergrund

Durch die Wärmezufuhr der Kerzenflamme dehnen sich die beiden Metalle, aus denen der Bimetallstreifen besteht, aus. Die beiden Metalle haben jedoch eine unterschiedlich starke Ausdehnung unter Wärmezufuhr und so geschieht es, dass sich der Bimetallstreifen in Richtung jenes Materials zu krümmen beginnt, welches eine geringere Ausdehnung unter Wärmeeinfluss aufweist.

Experiment 2: Volumsausdehnung einer Eisenkugel unter Wärmezufuhr

Materialien:

- Metallkugel
- Kette
- Ring
- Laborgasbrenner

Link und QR-Code zum Video:



<https://youtu.be/RaOHJrVjIjs>



Abbildung 3: Versuchsaufbau für die Volumsausdehnung einer Eisenkugel unter Wärmezufuhr; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Zur Demonstration der Volumsausdehnung einer Eisenkugel wird diese an einer Kette befestigt und durch einen Ring geführt, dessen Durchmesser gerade groß genug ist, dass die Kugel durch ihn hindurchgeführt werden kann. Hat man gezeigt, dass die Kugel in der Tat durch den Ring passt, wird sie mit Hilfe eines Laborgasbrenners erhitzt. Anschließend wird versucht die Kugel erneut durch den Ring zu führen und man beobachtet, dass diese nicht mehr durch den Ring passt. Als weiteren Effekt kann man die erhitzte Kugel in den Ring legen und abwarten bis diese sich wieder abgekühlt hat und schließlich von selbst durch den Ring fällt.

Physikalischer Hintergrund

Bei Zimmertemperatur besitzt die Eisenkugel ein Volumen, welches gerade so groß ist, dass man sie durch den Eisenring führen kann. Erwärmt man die Kugel jedoch, dehnt sich diese aus. Durch diese Ausdehnung gelingt es nicht mehr die Kugel durch den Ring zu führen. Legt man nun die erwärmte Kugel auf den Ring, so erwärmt sich der Ring, der sich in Folge der Wärmezufuhr ausdehnt. Wartet man nun bis sich die Kugel und der Ring wieder abgekühlt haben, so fällt die Kugel durch den Ring. Durch die Abkühlung ziehen sich die Eisenkugel und der Ring wieder zusammen und erreichen bei Zimmertemperatur schlussendlich wieder ihre Ausgangsgröße, wodurch die Kugel wieder durch den Ring passt.

Experiment 3: Volumsausdehnung einer Flüssigkeit unter Wärmezufuhr

Materialien:

- Tinte
- Wasser
- Becherglas
- Glaskolben
- Glasröhrchen
- Pfropfen mit Loch

Link und QR-Code zum Video:



<https://youtu.be/L9Ie0xrtRSE>



Abbildung 4: Volumsausdehnung einer Flüssigkeit unter Wärmezufuhr; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für dieses Experiment wird zu allererst ein Glaskolben mit kaltem, gefärbtem Wasser gefüllt und mit dem Pfropfen verschlossen. Danach wird ein Glasrohr durch das Loch im Pfropfen in das gefärbte Wasser getaucht, sodass das Rohr aus dem Glaskolben ragt. Der Raum zwischen dem Glasrohr und dem mit gefärbtem Wasser gefüllten Kolben ist nun abgedichtet, wodurch das Wasser nur noch durch das Glasrohr entweichen kann. Anschließend stellt man den Glaskolben mit dem Glasrohr in ein Becherglas, welches mit heißem Wasser gefüllt ist und lässt ihn darin stehen. Nach einiger Zeit kann man das gefärbte Wasser im Glasrohr emporsteigen sehen.

Physikalischer Hintergrund

Das Warmwasserbad im Becherglas erwärmt das gefärbte Wasser im Glaskolben. Durch diese Wärmezufuhr dehnt sich das gefärbte Wasser aus. Die einzige Möglichkeit für das gefärbte Wasser mehr Volumen einzunehmen, besteht darin, sich ins Glasrohr auszudehnen und dieses emporzusteigen.

Experiment 4: Volumsausdehnung von Luft unter Wärmezufuhr

Materialien:

- Glaskolben
- Pfropfen mit Loch
- Glasrohr
- Laborgasbrenner
- Durchsichtiges Gefäß
- Wasser

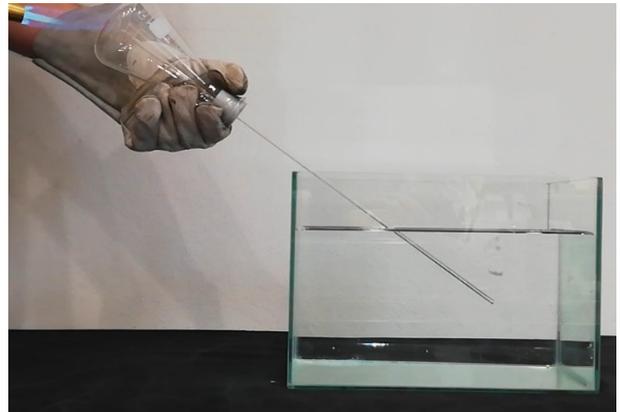


Abbildung 5: Aufsteigende Gasblasen aufgrund der Volumsausdehnung eingeschlossener Luft durch Wärmezufuhr; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Link und QR-Code zum Video:



<https://youtu.be/H0B-K-Hho1s>

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für diesen Versuch wird ein durchsichtiges Gefäß mit Wasser befüllt und ein Glaskolben mit einem Pfropfen verschlossen, welcher eine Öffnung besitzt, durch die ein Glasrohr in den Kolben eingeführt wird. Nun ist der Kolben gut abgedichtet und die Luft in seinem Inneren kann nur durch das Glasrohr entweichen. Taucht man nun das Glasrohr in das mit Wasser gefüllte Gefäß und erhitzt anschließend den Glaskolben, so kann man kleine Luftbläschen am Ende des Rohres ins Wasser aufsteigen sehen.

Physikalischer Hintergrund

Die Luft im Glaskolben nimmt bei Umgebungstemperatur ein gewisses Volumen ein. Durch das Eintauchen des Glasrohres in das Wasser wird die Luft im Glaskolben eingeschlossen. Erhitzt man nun den Glaskolben, so erwärmt sich auch die darin eingeschlossene Luft. Durch die Erhöhung der Temperatur dehnt sich die Luft im Glaskolben aus, wodurch die Luft im Glaskolben mehr Volumen benötigt, welches sie im Kolben jedoch nicht zur Verfügung hat. Der Luft bleibt schlussendlich nichts anderes übrig, als den Kolben durch das Glasrohr ins Wasser zu verlassen, wodurch sich die Luftblasen bilden.

3.2 WÄRME

3.2.1 Wärme und Wärmeenergie

Bringt man zwei Körper mit unterschiedlicher Temperatur in Kontakt, so wird Energie vom wärmeren Körper zum kälteren übertragen. Diese Energie, die aufgrund des Temperaturunterschieds vom warmen zum kalten Körper übertragen wird, wird *Wärme* oder *Wärmeenergie* genannt. Sie wird mit dem Buchstaben Q gekennzeichnet und hat die Einheit Joule.

Eine im Alltag ebenso gebräuchliche Einheit für Wärme ist die Kalorie (cal), welche als jene Wärmeenergie definiert ist, die benötigt wird, um 1 g Wasser um 1 °C zu erwärmen. Da die für die Temperaturerhöhung benötigte Wärmemenge leicht von der Temperatur des Stoffes abhängig ist, trifft diese Definition streng genommen nur für die Temperaturerhöhung von Wasser von 14,5 °C auf 15,5 °C zu. (Giancoli, 2009, S. 653)

3.2.2 Innere Energie

Im Gegensatz zur Temperatur, die ein Maß für die durchschnittliche kinetische Energie der Teilchen eines Körpers ist, bezieht sich die *innere Energie* auf die Summe der Energien aller Teilchen eines Körpers. Die innere Energie beinhaltet neben der kinetischen Energie der Teilchen auch die potentiellen Energien und Bindungsenergien der Teilchen, welche bei der Definition der Temperatur nicht miteinfließen.

Der Unterschied von Temperatur, Wärme und innerer Energie soll aufgrund seiner didaktischen Wichtigkeit im Physikunterricht hier noch einmal zusammengefasst werden. Temperatur ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Teilchen eines Stoffes, während sich die innere Energie auf die gesamte Energie aller Teilchen des Stoffes bezieht. Als Wärme bezeichnet man den Transport von Energie, welcher durch eine Temperaturdifferenz hervorgerufen wird. (Giancoli, 2009, S. 655)

3.2.3 Mechanisches Wärmeäquivalent

Wie im Kapitel *Wärme und Wärmeenergie* erwähnt, ist Wärme keine eigenständige physikalische Größe, sondern beschreibt lediglich eine Form von Energieübertragung. Wärme ist eng verknüpft mit physikalischer Arbeit und Energie. Die Vorstellung, dass Wärme und Energie miteinander verknüpft sind, geht auf James Prescott Joule (1818-1889) zurück. Eines seiner Experimente ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt. Das fallende Gewicht bewirkt eine Drehung der Plättchenräder, welche dadurch Arbeit am Wasser verrichten. Die Reibung der Plättchen am Wasser führt zu einem Temperaturanstieg des Wassers. Mit diesem und anderen Experimenten fand Joule heraus, dass eine bestimmte Menge Arbeit stets einer gewissen, ins System eingeflossenen, Wärmemenge entspricht. Man fand heraus, dass $1 \text{ cal (Wärme)} = 4,186 \text{ J (Arbeit)}$ entsprechen. Dieser Zusammenhang wird als *mechanisches Wärmeäquivalent* bezeichnet. (Gerthsen, 2006, S. 653-654)

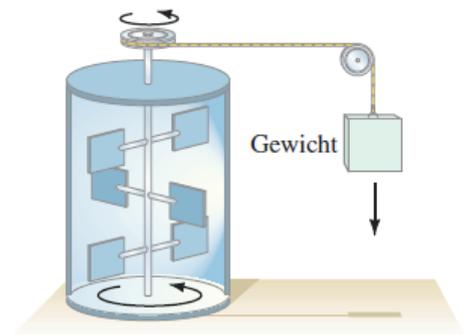


Abbildung 6: Joules Versuch zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents; (Gerthsen, 2006, S. 654)

Analog zum mechanischen Wärmeäquivalent gibt es auch das elektrische Wärmeäquivalent, welches dieselbe Größenordnung wie das mechanische Wärmeäquivalent aufweist, jedoch nicht den Zusammenhang zwischen mechanischer Arbeit und Wärmeenergie beschreibt, sondern den Zusammenhang zwischen elektrischer Energie und Wärmeenergie. Denselben Temperaturanstieg des Wassers wie in Joules Versuch könnte man auch durch das Erwärmen des Wassers auf einer Herdplatte erreichen.

Experiment 5: Mechanisches Wärmeäquivalent

Materialien:

- Drahtbügel
- Wärmebildkamera (FLIR)

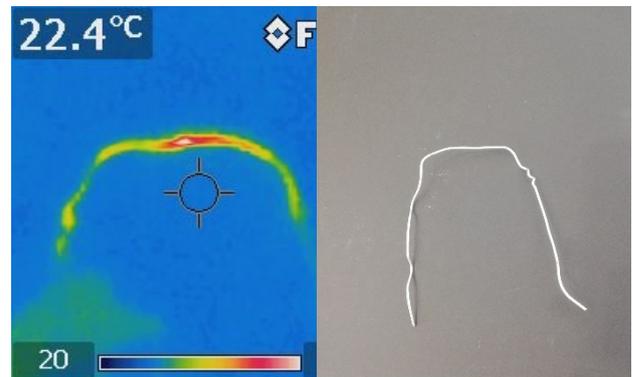


Abbildung 7: Gegenüberstellung: Drahtbügel nach mehrmaligem Biegen unter einer Wärmebildkamera und unter einer normalen Kamera; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für diesen Versuch wird ein Drahtbügel an einer Stelle mehrmals gebogen und anschließend unter einer Wärmebildkamera betrachtet. Man erkennt, dass die Temperatur an der Biegestelle größer ist, als die Temperatur des restlichen Drahtbügels.

Physikalischer Hintergrund

Durch die Scherungen und die Reibung des Materials, die das mehrmalige Biegen an der Biegestelle hervorruft, wird mechanische Arbeit in Wärmeenergie umgewandelt. Dadurch erwärmt sich der Drahtbügel an der Biegestelle und die Temperatur an dieser Stelle steigt an. Dieser Temperaturanstieg kann sogar so groß sein, dass eine Berührung der erwärmten Stelle zur Bildung von Brandblasen auf der Haut führen kann.

3.3 WÄRMEKAPAZITÄT

3.3.1 Spezifische Wärmekapazität

Führt man einem Stoff Wärmeenergie zu, so vergrößert sich entweder seine innere Energie oder sein Volumen. Bei der Änderung der inneren Energie führt die zugeführte Wärmeenergie, sofern kein Phasenübergang stattfindet, im Allgemeinen zu einer Erhöhung der Temperatur des Stoffes. Verändert sich durch die Energiezufuhr das Volumen des Körpers so wurde die zugeführte Energie in Volumsarbeit umgesetzt. Die Energiemenge, die benötigt wird um 1 kg eines bestimmten Stoffes um 1 K zu erwärmen, wird als *spezifische Wärmekapazität* des Stoffes bezeichnet. Man unterscheidet hier zwei Arten von spezifischer Wärmekapazität: Die spezifische Wärmekapazität unter konstantem Volumen und die spezifische Wärmekapazität unter konstantem Druck:

$$\Delta Q = m \cdot c_v \cdot \Delta T \quad (\text{F.5})$$

$$\Delta Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (\text{F.6})$$

ΔQ ... Wärme [Q] = J m ... Masse des Stoffes [m] = kg c_v ... spezifische Wärmekapazität des Stoffes unter konstantem Volumen [c_v] = J·kg⁻¹·K⁻¹ c_p ... spezifische Wärmekapazität des Stoffes unter konstantem Druck [c_p] = J·kg⁻¹·K⁻¹ ΔT ... Temperaturunterschied [ΔT] = K

Da die Energiezufuhr bei Festkörpern und Flüssigkeiten kaum zu einer Vergrößerung des Volumens führt, wird die Unterscheidung der beiden spezifischen Wärmekapazitäten für diese Stoffe meist vernachlässigt. In diesen Fällen beschreibt die spezifische Wärmekapazität unter konstantem Volumen den Sachverhalt relativ genau. Bei der Betrachtung von Gasen spielt die Volumsausdehnung jedoch eine wesentlich größere Rolle. Deshalb muss man bei Gasen die zwei Arten der spezifischen Wärmekapazität sehr wohl unterscheiden. Der Unterschied der beiden spezifischen Wärmekapazitäten liegt in ihrer Größe. Bei konstantem Volumen des Stoffes wird die zugeführte Energie zur Veränderung der inneren Energie dieses Stoffes benutzt. Bei der Aufrechterhaltung von konstantem Druck erfolgt jedoch eine Volumsänderung des Stoffes und die Energie, die für diese Volumsänderung benötigt wird, wird der zugeführten Wärmeenergie entzogen. Man benötigt daher mehr Energie, um die Temperatur eines Stoffes unter konstantem Druck zu erhöhen, als unter konstantem Volumen. Der Wert c_p ist demnach stets größer als der Wert c_v . (Tipler & Mosca, 2014, S. 568, 583)

3.3.2 Kalorimetrie

Um die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes zu bestimmen, benutzt man ein *Kalorimeter*. Ein Beispiel für den Aufbau eines Kalorimeters lässt sich in Abbildung 8 schematisch ablesen. Die Funktionsweise des Kalorimeters in diesem Beispiel ist wie folgt: Das Ziel ist es, die spezifische Wärmekapazität c eines Metallstücks zu bestimmen. Dazu bestimmt man zuerst die Masse m_2 des Metallstücks und bringt es anschließend auf eine bekannte Temperatur von T_2 . Hier wird ein Wasserdampfbad benutzt um die Temperatur T_2 auf 100 °C zu bringen. Des Weiteren befindet sich unter dem Metallstück ein Behälter mit Wasser. Die Temperatur T_1 , die Masse m_1 und die spezifische Wärmekapazität c_0 des Wassers sowie die spezifische Wärmekapazität c_b des Behälters sind bekannt. Lässt man nun das Metallstück in das Wasser fallen, so stellt sich nach einer gewissen Zeit eine Mischtemperatur T_m ein. Da die abgegebene und aufgenommene Wärme laut des Energiesatzes gleich sein müssen folgt: (Gerthsen, 2006, S. 214)

$$Q_{ab} = c \cdot m_2 \cdot (T_2 - T_m) = Q_{auf} = (c_0 \cdot m_1 + c_b) \cdot (T_m - T_1) \quad (\text{F.7})$$

Umstellen der Gleichung auf das gesuchte c ergibt:

$$c = \frac{(c_0 \cdot m_1 + c_b) \cdot (T_m - T_1)}{m_2 \cdot (T_2 - T_m)} \quad (\text{F.8})$$

Q_{ab} ... abgegebene Wärme [Q_{ab}] = J

Q_{auf} ... aufgenommene Wärme [Q_{auf}] = J

c ... spez. Wärmekapazität des untersuchten Objekts

$$[c] = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

c_0 ... spez. Wärmekapazität von Wasser [c_0] = $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

c_b ... spez. Wärmekapazität des Behälters [c_b] = $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

m_1 ... Masse des Wassers [m_1] = kg

m_2 ... Masse des untersuchten Objekts [m_2] = kg

T_1 ... Temperatur des Wassers [T_1] = K

T_2 ... Temperatur des untersuchten Objekts [T_2] = K

T_m ... Mischtemperatur [T_m] = K

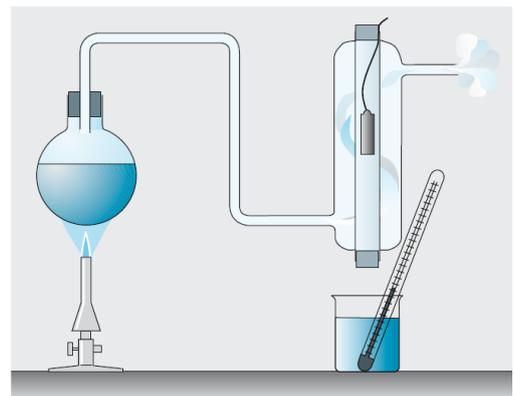


Abbildung 8: Aufbau eines Kalorimeters
(Gerthsen, 2006, S. 214)

Experiment 6: Wärmekapazität eines Kalorimeters und eines Probekörpers

Materialien:

- Kochtopf
- Wasser
- Becherglas
- Waage
- Thermometer
- Blei- und Kupfergewicht



Abbildung 9: Geräte für die Bestimmung von Wärmekapazitäten diverser Probekörper; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Wärmekapazität eines Kalorimeters

Um die Wärmekapazität eines Gefäßes (hier: Kochtopf), welches später gemeinsam mit dem Rührstab und dem enthaltenen Wasser als Kalorimeter dienen soll, zu bestimmen, wird zuerst die Temperatur des Rührstabs und des Kochtopfs gemessen. Der Rührstab und der Kochtopf sollten für den Versuch dieselbe Temperatur besitzen. Anschließend wird eine vorher gewogene Menge Wasser auf eine bekannte Temperatur gebracht und in den Kochtopf geleert. Dabei ist zu beachten, dass auch der Rührstab im Kochtopf platziert sein sollte, da dieser als Teil des Gefäßes betrachtet wird. Nun misst man unter ständigem Umrühren mit dem Rührstab solange die Temperatur des Wassers, bis sich ein Temperaturgleichgewicht T_m zwischen Wasser, Kochtopf und Rührstab eingestellt hat.

Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Wärmekapazität eines Probekörpers

Zur Bestimmung der Wärmekapazität eines Probekörpers (hier: Kupfer- oder Bleigewicht), wird dieser zuerst gewogen und auf eine bekannte Temperatur gebracht. In dieser Durchführung wurde das Bleigewicht mit Hilfe eines Dampfbades auf 100 °C gebracht. Nun misst man die Masse und die Temperatur des Wassers, welches in das Kalorimeter geschüttet wird. Das Bleigewicht wird nun in das Kalorimeter gegeben und die Temperatur des Wassers wird unter ständigem Umrühren gemessen. Dies geschieht solange, bis sich ein Temperaturgleichgewicht T_m eingestellt hat.

Berechnung der Wärmekapazität des Kalorimeters

Um aus den in der Durchführung gemessenen Werten die Wärmekapazität des Gefäßes (inkl. Rührstab) zu bestimmen, ist folgende Rechnung nötig:

$$Q_{ab} = m_w \cdot c_w \cdot (T_w - T_m) = c_g \cdot (T_m - T_g) = Q_{auf}$$

Q_{ab} ... abgegebene Wärme [Q_{ab}] = J Q_{auf} ... aufgenommene Wärme [Q_{auf}] = J

c_g ... spez. Wärmekapazität des Gefäßes inkl. Rührstab [c_g] = $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

c_w ... spez. Wärmekapazität von Wasser [c_w] = $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ m_w ... Masse des Wassers [m_w] = kg

T_w ... Temperatur des Wassers [T_w] = K T_g ... Temperatur des Gefäßes inkl. Rührstab

[T_g] = K T_m ... Mischtemperatur [T_m] = K

Umstellen der Gleichung und anschließende Berechnung von c_g liefert die gesuchte Wärmekapazität des Gefäßes. Die Wärmekapazität des Kalorimeters ergibt sich schlussendlich aus der Wärmekapazität des Gefäßes (inkl. Rührstab) und der Wärmekapazität des darin enthaltenen Wassers.

Analog zu diesem Versuch würde die Bestimmung der Wärmekapazität von Wasser c_w ablaufen, nur müsste für die Berechnung von c_w der Wert c_g des Gefäßes inkl. Rührstab schon bekannt sein.

Berechnung der Wärmekapazität des Probekörpers

Um schlussendlich die Wärmekapazität c des Probekörpers zu berechnen, bedient man sich Formel F.8:

$$c = \frac{(c_w \cdot m_w + c_g) \cdot (T_m - T_w)}{m_p \cdot (T_p - T_m)}$$

c ... spez. Wärmekapazität des untersuchten Objekts [c] = $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

c_w ... spez. Wärmekapazität von Wasser [c_w] = $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

c_g ... spez. Wärmekapazität des Gefäßes inkl. Rührstab [c_g] = $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

m_w ... Masse des Wassers [m_w] = kg m_p ... Masse des Probekörpers [m_p] = kg

T_w ... Temperatur des Wassers [T_w] = K T_p ... Temperatur des Probekörpers [T_p] = K

T_m ... Mischtemperatur [T_m] = K

Experiment 7: Der nicht platzende Ballon

Materialien:

- Luftballons
- Wasser
- Kerze

Link und QR-Code zum Video:



<https://youtu.be/mhrLRtiUZ1U>



Abbildung 10: Ein mit Wasser gefüllter Luftballon über einer Kerzenflamme; eigenes Bild

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für diesen Versuch füllt man einen Luftballon mit etwas Wasser und bläst ihn auf. Anschließend wird ein weiterer Luftballon ohne Wasser auf dieselbe Größe aufgeblasen. Zur Demonstration wird der Luftballon ohne Wasser über die Kerze gehalten und man sieht, dass dieser sofort platzt. Nun wird der Luftballon mit Wasser so über die Kerze gehalten, dass sich das Wasser im Ballon über der Kerzenflamme befindet. Man kann beobachten, dass der Ballon auch nach längerer Zeit über der Kerze nicht platzt.

Physikalischer Hintergrund

In dem Ballon, der nur mit Luft gefüllt ist, ist der Wärmeübergang zwischen dem Gummi des Luftballons und der Luft in seinem Inneren aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit der Luft sehr schlecht. Daher wird die durch die Kerze zugeführte Wärmeenergie fast ausschließlich zur Erwärmung des Gummis verwendet, was den Gummi zum Schmelzen und den Ballon zum Platzen bringt. In dem mit Wasser gefüllten Ballon kann die Wärmeenergie der Kerze gut vom Gummi an das Wasser weitergeleitet werden, da Wasser eine viel größere Wärmeleitfähigkeit als Luft besitzt. Das erwärmte Wasser steigt auf und dessen Platz nimmt kühles Wasser ein, welches den Gummi abkühlt und so das Platzen des Ballons verhindert. Der Gummi würde erst platzen, wenn die Temperatur des Wassers die Schmelztemperatur des Gummis erreicht hat. Aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität des Wassers dauert dies jedoch sehr lange bzw. ist nach Art des Gummis und dessen Schmelzpunkt erst gar nicht erreichbar.

3.4 DER ERSTE HAUPTSATZ DER WÄRMELEHRE

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre ist eine Folge des Energieerhaltungssatzes in der Thermodynamik. Er besagt, dass die Änderung der inneren Energie ΔU eines geschlossenen Systems gleich der netto zugeführten Arbeit ΔW und netto zugeführten Wärme ΔQ ist: (*Tipler & Mosca, 2014, S. 576*)

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \quad (\text{F.9})$$

ΔU ... Änderung der inneren Energie des Systems [ΔU] = J ΔQ ... netto zugeführte Wärme [ΔQ] = J ΔW ... netto zugeführte Arbeit [ΔW] = J

3.5 KINETISCHE GASTHEORIE

3.5.1 Das Modell des idealen Gases

Die allgemeine Beschreibung von Gasen in der Thermodynamik ist sehr kompliziert. Daher versucht man sinnvolle Vereinfachungen vorzunehmen, die eine näherungsweise Beschreibung dieser Gase und ihrem Verhalten ermöglichen. Diese Vereinfachungen sind folgende: (*Giancoli, 2009, S. 627*)

- Es gibt eine große Anzahl N an Teilchen in einem Gas, welche alle dieselbe Masse m besitzen.
- Der durchschnittliche Abstand der Teilchen ist sehr viel größer als ihr Durchmesser. Daher kann ihre Ausdehnung vernachlässigt werden und sie werden als punktförmig angenommen.
- Die Teilchen des Gases bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in zufällige Richtungen.
- Außer Stößen finden zwischen den einzelnen Teilchen keine Wechselwirkungen statt. Außerdem werden diese Stöße als perfekt elastisch angenommen. Zwischen den Stößen bewegen sich die Teilchen kräftefrei.

3.5.2 Die Zustandsgleichung des idealen Gases

Da sich Gase, im Vergleich zu Festkörpern und Flüssigkeiten, auf beliebig große Volumina ausdehnen können, ist es nur sinnvoll, Eigenschaften eines Gases in einem fixen Volumen zu beschreiben. Dieses Volumen wird als Behälter angenommen, der das Gas vollkommen einschließt und das Volumen V besitzt. In diesem Behälter befindet sich nun ein Gas mit einer festen Anzahl von Teilchen. Diese Teilchenzahl bezeichnet man mit N . Durch Teilchenstöße der Gasmoleküle mit den Wänden des Behälters, übertragen die Teilchen Impuls auf die Gefäßwand und das Gas übt damit einen bestimmten Druck p auf den Behälter aus. Erhöht man die Temperatur T des Gases und damit auch die mittlere kinetische Energie der Teilchen, so steigt der Druck aufgrund stärkerer und häufigerer Teilchenstöße mit den Wänden des Behälters. Diese vier genannten Größen (V , N , p und T) werden als *Zustandsgrößen* des Gases bezeichnet. (Sextl, 2012, S. 21-22)

Es hat sich gezeigt, dass diese Zustandsgrößen voneinander abhängig sind. Ändert man eine dieser Größen, so ändert sich auch mindestens eine weitere. Dieser Zusammenhang wird durch die *Zustandsgleichung für ideale Gase* beschrieben :

$$p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T \quad (\text{F.10})$$

p ... Druck [p] = $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ V ... Volumen [V] = m^3 N ... Teilchenanzahl

[N] = dimensionslos k_B ... Boltzmann-Konstante [k_B] = $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ T ... Temperatur [T] = K

Nun kann man versuchen die Auswirkungen einer Änderung von einer der Zustandsgrößen auf eine andere zu untersuchen. Da man davon ausgeht, dass sich die Anzahl der Teilchen N in dem Behälter nicht verändert, beschränkt man sich dabei auf die Größen p , V und T . Die Untersuchung sieht nun vor, jeweils eine der drei Zustandsgrößen konstant zu halten, während man eine andere verändert. Die daraus resultierenden Änderungen an der dritten Zustandsgröße sollen untersucht werden. Dies führt zu drei verschiedenen sogenannten *Zustandsänderungen*:

3.5.3 Isochore Zustandsänderung

Erhöht man die Temperatur des eingeschlossenen Gases durch Zufuhr von Wärmeenergie, bei gleichbleibendem Behältervolumen, so stellt man fest, dass der Druck zunimmt. Diese Zustandsänderung wird *isochore Zustandsänderung* genannt. Sie hat folgende Ursache:

Aus dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre weiß man, dass:

$$\Delta Q = \Delta U - \Delta W \quad (\text{F.11})$$

ΔQ ... netto zugeführte Wärme [Q] = J ΔU ... Änderung der inneren Energie des Systems

[ΔU] = J ΔW ... netto zugeführte Arbeit [ΔW] = J

Da das Volumen des Behälters bei Wärmezufuhr konstant bleibt, verrichtet das Gas keine Arbeit am Behälter ($\Delta W = 0$). Das bedeutet, dass die gesamte zugeführte Wärmeenergie in innere Energie und folglich in eine Temperaturerhöhung übergeht. Durch die Temperaturerhöhung wird die mittlere kinetische Energie der Teilchen größer und damit auch die Stärke und Häufigkeit der Stöße der Teilchen mit den Wänden des Behälters, was schließlich zu einer Druckerhöhung führt. Es besteht also eine Abhängigkeit von der Temperatur und dem Druck eines Gases, welche folgendermaßen beschrieben wird:

$$\frac{p}{T} = \text{const} \quad (\text{F.12})$$

p... Druck [p] = $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ T... Temperatur [T] = K

In einem Temperatur-Druck Diagramm veranschaulicht, sieht dieser Zusammenhang folgendermaßen aus:

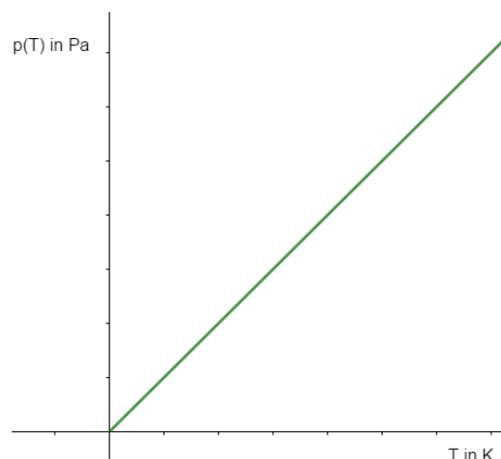


Abbildung 11: p-T Diagramm für eine isochore Zustandsänderung; eigenes Bild;
p(T)... Druck T... Temperatur

3.5.4 Isotherme Zustandsänderung

Verändert man das Volumen des Behälters bei gleichbleibender Temperatur, so erkennt man, dass sich auch der Druck verändert. Dieser indirekte Zusammenhang zwischen Volumen und Druck bei konstanter Temperatur wird *isotherme Zustandsänderung* genannt.

Man stellt sich nun den Behälter so vor, dass eine Wand des Behälters beweglich ist und sich verschieben lässt. Das Volumen des Behälters kann sich also durch die Bewegung der Wand vergrößern oder verkleinern. Führt man nun dem Gas im Behälter Wärmeenergie zu und verlangt, dass die Temperatur konstant bleiben soll, so muss die zugeführte Wärmeenergie in Volumsarbeit des Gases umgesetzt werden (siehe F.11 mit $\Delta U = 0$). Diese Volumsarbeit führt dazu, dass die bewegliche Wand weggedrückt wird und sich so das Volumen im Behälter vergrößert. Schließlich führt ein größeres Volumen, welches nun für das Gas zur Verfügung steht, zu einer Druckabnahme im Behälter. In diesem Fall liegt eine *isotherme Expansion* vor.

Verrichtet man umgekehrt von außen Arbeit am Behälter (man drückt ihn zusammen), so verringert sich das Behältervolumen, der Druck im Behälter steigt an und die entstehende Wärme wird nach außen abgegeben. In diesem Fall liegt eine *isotherme Kompression* vor.

Die zugrundeliegende Gesetzmäßigkeit wird *Boyle-Mariotte'sches Gesetz* genannt:

$$p \cdot V = \text{const} \quad (\text{F.13})$$

p... Druck [p] = $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ V... Volumen [V] = m^3

Abbildung 12 zeigt den Zusammenhang von Druck und Volumen aufgrund des Boyle-Mariotte'schen Gesetzes:

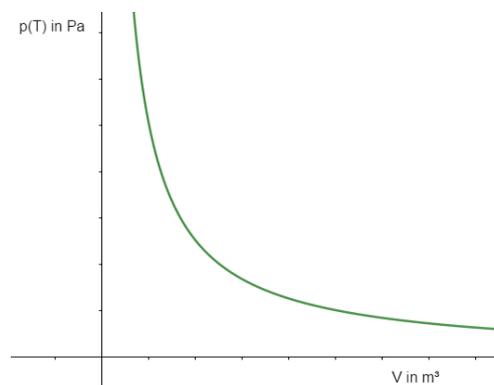


Abbildung 12: p-V Diagramm für eine isotherme Zustandsänderung; eigenes Bild;
p(T)... Druck V... Volumen

3.5.5 Isobare Zustandsänderung

Führt man dem Gas im Behälter Wärmeenergie zu und verlangt, dass der Druck konstant bleiben soll, so muss sich das Volumen des Behälters vergrößern. Gleichzeitig erhöht sich durch die Wärmezufuhr von außen auch die innere Energie und damit die Temperatur des Gases. Dieser Prozess wird *isobare Zustandsänderung* genannt. Die zugeführte Wärmeenergie wird also in Volumsarbeit und in die Änderung der inneren Energie umgewandelt:

$$\Delta Q = \Delta U - \Delta W \quad (\text{F.14})$$

ΔQ ... netto zugeführte Wärme [Q] = J ΔU ... Änderung der inneren Energie des Systems
[ΔU] = J ΔW ... netto zugeführte Arbeit [W] = J

Dieser Zusammenhang von Temperatur und Volumen wird *Gay-Lussac'sches Gesetz* genannt:

$$\frac{V}{T} = \text{const} \quad (\text{F.15})$$

V... Volumen [V] = m³ T... Temperatur [T] = K

In einem V-T Diagramm lässt sich der Zusammenhang folgendermaßen darstellen:

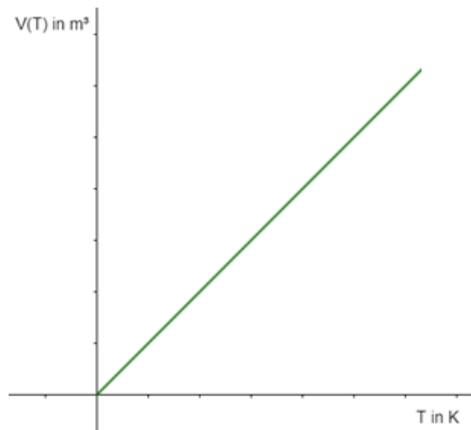


Abbildung 13: V-T Diagramm für eine isobare Zustandsänderung; eigenes Bild
V(T)... Volumen T... Temperatur

3.5.6 Adiabatische Zustandsänderung

Unter einer *adiabatischen Zustandsänderung* versteht man einen Vorgang, bei dem ein System (hier: der Behälter mit dem eingeschlossenen Gas) keinen Wärmeaustausch mit der Umgebung vollzieht. Bei dieser Zustandsänderung wird also weder Wärme zugeführt noch abgeführt ($\Delta Q = 0$). Gründe für den fehlenden Wärmeaustausch könnte zum einen ein sehr gut isolierter Behälter, oder ein zu schnell ablaufender Prozess sein, bei dem die Zeit für einen Wärmeaustausch zu kurz ist. (Giancoli, 2009, S. 665)

Im Alltag kann man eine adiabatische Zustandsänderung oft beobachten. Öffnet man eine Getränkeflasche, so sieht man oft einen entstehenden Nebel über der Flüssigkeit. Dieser Nebel entsteht durch Prozesse, die beim Öffnen der Flasche ablaufen. Durch das Öffnen gleicht sich der Überdruck in der Flasche aus und die Temperatur sinkt für kurze Zeit so stark, dass der Wasserdampf über der Flüssigkeit kondensiert und so den Nebel bildet. Charakteristisch für adiabatische Zustandsänderungen ist die gleichzeitige Änderung aller drei Zustandsgrößen und der fehlende Wärmeaustausch während des Prozesses.

In Abbildung 14 wird die adiabatische Zustandsänderung zusammen mit den drei weiteren Zustandsänderungen dargestellt:

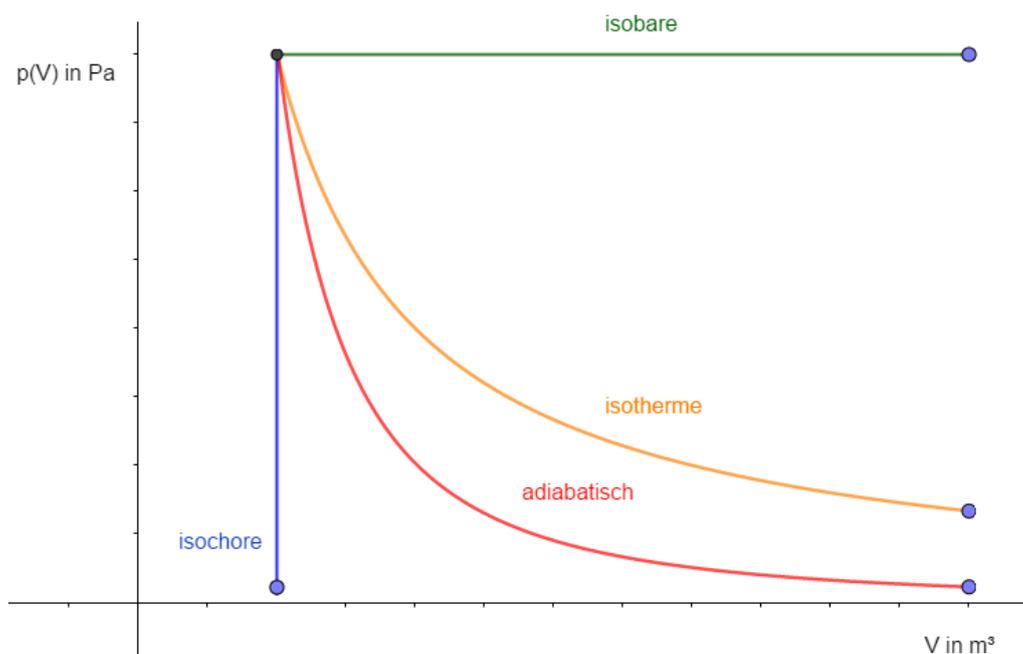


Abbildung 14: Zustandsänderungen im p-V Diagramm im Vergleich; eigenes Bild
p(V)... Druck V... Volumen

Experiment 8: Isochore Zustandsveränderung: „The Dancing Coin“

Materialien:

- 10-Cent Münze
- Glasflasche

Link und QR-Code zum Video:



https://youtu.be/Xl_heDPW_e0



Abbildung 15: Zufuhr von Wärme auf eine mit einer Münze verschlossene Glasflasche; eigenes Bild

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für diesen Versuch wird zuerst die Öffnung der Glasflasche mit etwas Speichel befeuchtet und anschließend eine 10-Cent Münze daraufgelegt, um die Luft in der Flasche einzuschließen. Nun legt man seine Hände um die Glasflasche und hält diese fest. Man kann beobachten, dass sich die Münze auf der Flasche zu heben beginnt, die eingeschlossene Luft entweicht und die Münze zurück auf die Flaschenöffnung fällt. Dieser Vorgang wiederholt sich einige Male.

Physikalischer Hintergrund

Sobald die Münze die Luft in der Glasflasche einschließt, steht der Luft in der Flasche ein konstantes Volumen zur Verfügung. Hält man nun die Flasche mit beiden Händen fest, so erwärmt sich die Flasche und folge dessen auch die Luft in ihrem Inneren. Zeitgleich zur Temperatur steigt auch der Druck in der Flasche (isochore Zustandsänderung). Der Druck steigt bis zu jenem Punkt, an dem er groß genug ist, um die Münze anzuheben. Durch die Hebung der Münze entsteht eine Öffnung, durch die die Luft entweichen kann. Durch das Entweichen der Luft fällt der Druck wieder und der Prozess beginnt von vorne.

Experiment 9: Isochore Zustandsänderung: Flaschenimplosion

Materialien:

- Plastikflasche
- Wanne
- Kaltes Wasser
- Heißes Wasser

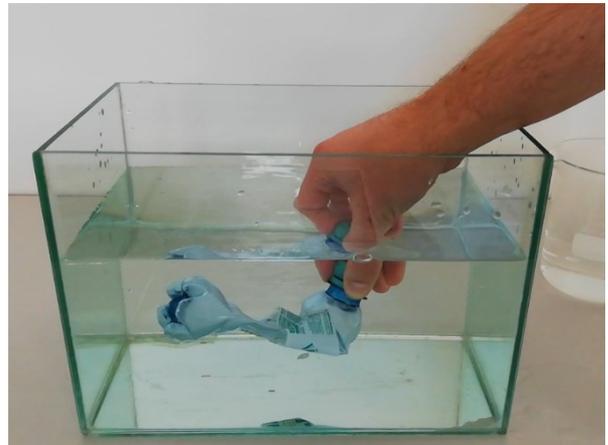


Abbildung 16: Implosion einer Plastikflasche durch Abkühlung; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Um diesen Versuch durchzuführen wird eine Wanne mit kaltem Wasser gefüllt. Nun wird eine innen trockene und offene Plastikflasche bis zum Flaschenhals in heißes Wasser getaucht, um die Flasche und die darin enthaltene Luft zu erwärmen. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass kein Wasser ins Innere der Flasche gelangt. Nach etwa einer Minute im Warmwasserbad wird die Flasche luftdicht verschlossen und in die Wanne mit dem kalten Wasser getaucht. Man kann erkennen, dass die Flasche zusammengedrückt wird.

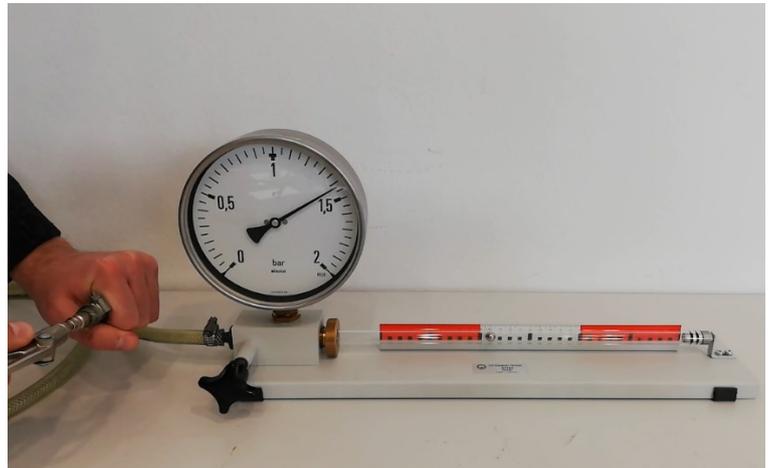
Physikalischer Hintergrund

Durch das Verschließen der Plastikflasche steht der warmen Luft in ihrem Inneren ein konstantes Volumen zur Verfügung. Die Luft im inneren der Flasche wird durch das Eintauchen in das Kaltwasserbad stark abgekühlt, wodurch, aufgrund der isochoren Zustandsänderung, auch der Druck im inneren der Flasche sinkt. Nun ist der Druck in der Flasche geringer als der Umgebungsdruck im Wasserbad, was schlussendlich zum Zusammendrücken der Flasche führt.

Experiment 10: Isotherme Zustandsänderung

Materialien:

- Kompressor
- Boyle-Mariotte Apparatur



Link und QR-Code zum Video:



<https://youtu.be/6rKQpLufsWw>

Abbildung 17: Volumsverkleinerung durch Druckerhöhung in einer Boyle-Mariotte Apparatur; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die Boyle-Mariotte Apparatur besteht aus einem Manometer, welches den eingehenden Druck misst und einer Röhre mit einer Skala, in der sich eine Eisenkugel befindet, um das Volumen in der Röhre anzuzeigen. Pumpt man nun mit Hilfe eines Kompressors Luft in die Röhre, so zeigt das Manometer einen höheren Druck an. Gleichzeitig bewegt sich die Eisenkugel im Rohr nach rechts.

Physikalischer Hintergrund

Durch die Zufuhr von Luft durch den Kompressor, erhöht sich der Druck im Rohr, weshalb das Manometer einen höheren Druck anzeigt. Gleichzeitig wird die Eisenkugel durch den höheren Druck nach rechts bewegt, wodurch sich das Volumen im Rohr rechts von der Eisenkugel verkleinert. Dieser Vorgang zeigt schemenhaft das indirekte Verhältnis von Druck und Volumen bei einer isothermen Zustandsveränderung.

Experiment 11: Isobare und isochore Zustandsänderung

Materialien:

- Glaskolben
- Luftballon
- Laborgasbrenner
- Haltevorrichtung

Link und QR-Code zum Video:



<https://youtu.be/Bm4oDPfvmyM>

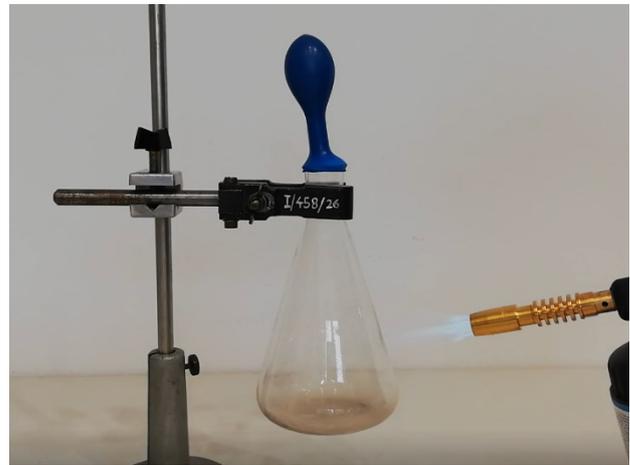


Abbildung 18: Volumsausdehnung von Luft in einem Glaskolben durch Wärmezufuhr; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Man benötigt für dieses Experiment einen in einer Haltevorrichtung befestigten Glaskolben, über den ein Luftballon gestülpt wird. Der Kolben wird nun mit Hilfe eines Laborgasbrenners erwärmt. Man kann beobachten, dass sich der Luftballon bis zu einer gewissen Größe aufbläht.

Physikalischer Hintergrund

Durch das Erhitzen des Kolbens steigt auch die Temperatur der Luft in seinem Inneren. Da der Luft aufgrund des übergestülpten Luftballons mehr Volumen als nur jenes des Glaskolbens zur Verfügung steht, ändert sich mit der Temperatur der Luft auch ihr Volumen, während der Druck für kurze Zeit konstant bleibt (isobare Zustandsänderung). Der Druck bleibt annähernd konstant, da der Luftballon am Anfang beinahe keinen Widerstand gegen die Ausdehnung der Luft leistet. Erst ab dem Punkt, an dem der Luftballon einen nicht vernachlässigbar großen Widerstand gegen die weitere Ausdehnung der Luft leistet, bleibt das Volumen der Luft konstant, während Temperatur und Druck ansteigen (isochore Zustandsänderung).

Experiment 12: Adiabatische Kompression („Das pneumatische Feuerzeug“)

Materialien:

- Durchsichtiges Rohr
- Kolben
- Watte

Link und QR-Code zum Video:



https://youtu.be/Jxa_JXsqYqM

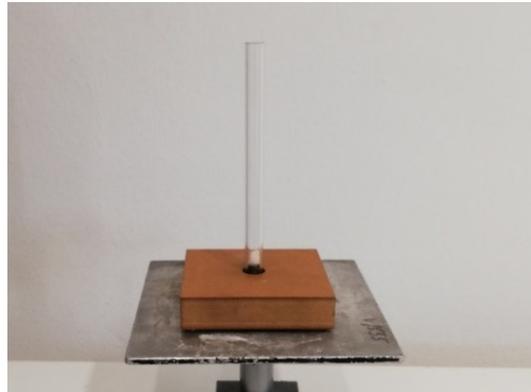


Abbildung 19: Aufbau für den Demonstrationsversuch: Pneumatisches Feuerzeug; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für dieses Experiment wird ein durchsichtiges Rohr und ein Kolben, der sich in diesem Rohr bewegen kann und dieses möglichst gut abdichtet, benötigt. Das Rohr muss dabei an einem Ende dicht verschlossen und am anderen Ende offen sein, sodass dort der Kolben dort eingeführt werden kann. Das letzte notwendige Material ist eine kleine Wattekugel, die man am Boden des Rohres platziert. Für die Durchführung des Versuchs wird der Kolben von der offenen Seite des Rohres so schnell und kraftvoll wie möglich nach unten gedrückt. Man kann beobachten, dass sich die Wattekugel kurz entzündet.

Physikalischer Hintergrund

Die Kompression der Luft innerhalb des Rohres erfolgt so schnell, dass keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht werden kann. Diese Kompression wird adiabatische Kompression genannt. Durch die Druckerhöhung im Inneren des Rohres wird nach dem Gesetz von Gay-Lussac die darin enthaltene Luft so stark erwärmt, dass ihre Temperatur ausreichend groß ist, um die Wattekugel zu entzünden.

Experiment 13: Adiabatische Expansion („Nebel in der Flasche“)

Materialien:

- Flasche
- Kochend heißes Wassers
- Luftpumpe (Kompressor)



Abbildung 20: Nebel in einer Plastikflasche; eigenes Bild

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/RAVsNMaHRmg>

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Aufbau dieses Versuchs besteht aus einer Plastikflasche, in deren Verschluss ein Loch gebohrt wurde. Man befüllt zunächst etwa ein Fünftel der Flasche mit kochend heißem Wasser und verschließt diese anschließend mit dem präparierten Verschluss. Nach mehrmaligem Schütteln der Flasche schließt man an das zuvor gebohrte Loch im Verschluss einen Kompressor an. Nun wird Luft in die Flasche gepumpt, sodass sich im Inneren ein hoher Druck aufbaut. Ist der Druck in der Flasche groß genug, so entfernt man schnell den Kompressor Anschluss am präparierten Flaschenverschluss. Man hört die Luft in der Flasche entweichen während sich im Inneren der Flasche schlagartig Nebel bildet.

Physikalischer Hintergrund

Entfernt man den Kompressor Anschluss am präparierten Flaschenverschluss während in der Flasche ein Überdruck vorliegt, so entweicht die Luft in der Flasche und der Druck sinkt schlagartig ab. Dies geschieht so schnell, dass kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet. Dieser Prozess wird adiabatische Expansion genannt. Nach dem Gesetz von Gay-Lussac geht mit der Druckerniedrigung ein Temperaturabfall einher. Durch diesen kondensiert der Wasserdampf im Inneren der Flasche und es entsteht Nebel.

Experiment 14: Dosenimplosion

Materialien:

- Dose
- Kaltes Wasser
- Wanne
- Zange
- Laborgasbrenner



Abbildung 21: Dosenimplosion; eigenes Bild

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/0lXrZYEeMg4>

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Versuchsaufbau besteht darin, die Wanne mit dem kalten Wasser zu befüllen. Danach wird etwas Wasser in die Dose gefüllt und dieses mit Hilfe eines Laborgasbrenners, der die Unterseite der Dose erhitzt, zum Kochen gebracht. Die Dose wird währenddessen mit einer Zange gehalten. Sobald das Wasser kocht und der Wasserdampf die Luft aus der Dose verdrängt hat, wird die Dose mit der Öffnung nach unten in die Wanne mit dem kalten Wasser gestellt und man kann beobachten, dass die Dose schlagartig zusammengedrückt wird.

Physikalischer Hintergrund

Beim Erhitzen der Dose beginnt das darin enthaltene Wasser zu kochen und erzeugt heißen Wasserdampf, welcher die zuvor in der Dose enthaltene Luft vollständig verdrängt. Wird die Dose mit der Öffnung nach unten in kaltes Wasser gestellt, so wird diese einerseits verschlossen, es kann also keine Luft von außen in die Dose gelangen und andererseits kühlt der Wasserdampf im Inneren der Dose ab, wodurch dieser kondensiert. Flüssiges Wasser benötigt sehr viel weniger Volumen als gasförmiges Wasser der gleichen Menge (1 L flüssiges Wasser entspricht etwa 1600 L Wasserdampf). Aufgrund dessen entsteht in der Dose ein Unterdruck, welcher zusammen mit dem größeren, äußeren Luftdruck zur Implosion der Dose führt.

3.6 WÄRMETRANSPORT

Wärme kann durch Wärmeleitung, Wärmeströmung und Wärmestrahlung übertragen werden. Dabei findet der Prozess der Wärmeleitung in Materie statt und erfolgt durch Energieübertragung von Atom- bzw. Molekülstößen, wobei die betreffenden Teilchen dabei ihre ursprüngliche Position beibehalten. Bei dem Wärmetransport durch Wärmeströmung wird Wärme hingegen gemeinsam mit Materie transportiert. Wärmestrahlung ist elektromagnetischer Natur. Durch sie kann Wärme berührungsfrei durch elektromagnetische Strahlung abgegeben werden. Im Folgenden werden die drei Arten des Wärmetransports näher betrachtet.

3.6.1 Wärmeleitung

Betrachtet man einen Stoff, der an zwei Stellen eine unterschiedliche Temperatur aufweist, so wird Wärmeenergie von der wärmeren zur kälteren Stelle transportiert. Die geschieht aufgrund von Atom- bzw. Molekülstößen innerhalb des Stoffes. Wird beispielsweise ein Metallstab an einem Ende erwärmt, so schwingen die Atome an diesem Ende stärker als jene am kühlen Ende. Die schwingenden Atome geben nun ihre kinetische Energie durch Zusammenstöße an benachbarte Atome weiter. Dieser Prozess wird *Wärmeleitung* genannt. Wärmeleitung findet sowohl in Festkörpern, Flüssigkeiten als auch in Gasen statt, jedoch ist der Effekt in Festkörpern am stärksten zu beobachten. (Tipler & Mosca, 2014, S. 632)

Die in einer Zeiteinheit Δt übertragene Wärme ΔQ wird als Wärmestrom bezeichnet:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (\text{F.16})$$

I... Wärmestrom [I] = W Q... Wärme [Q] = J t... Zeit [t] = s

Fließt dieser Wärmestrom nun durch einen Körper hindurch, so spricht man von Wärmeleitung. Wie gut ein Stoff Wärme leitet, gibt die sogenannte Wärmeleitfähigkeit an. Für einen Körper mit Querschnittsfläche A und Länge Δx ist diese folgendermaßen definiert: (Jaros, Nussbaumer, & Nussbaumer, 2012, S. 16)

$$\lambda = \frac{I \cdot \Delta x}{A \cdot \Delta T} \quad (\text{F.17})$$

λ ... Wärmeleitfähigkeit [λ] = $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ I ... Wärmestrom [I] = W Δx ... Längenänderung [Δx] = m A ... Querschnittsfläche des Körpers [A] = m^2 ΔT ... Temperaturdifferenz [ΔT] = K

3.6.2 Wärmeübergang

An der Grenzfläche eines Fluids (Flüssigkeit oder Gas) zu einem Festkörper kann Wärme von einem Körper zum anderen fließen, wenn eine entsprechende Temperaturdifferenz vorliegt. Dieser Effekt wird als *Wärmeübergang* bezeichnet. Am häufigsten tritt dieser Effekt bei Fluiden auf, die an einem Festkörper vorbeiströmen. Ein Beispiel aus dem Alltag wäre kalte Außenluft, die an einer wärmeren Hauswand vorbeiströmt. Bei einer Temperaturdifferenz ΔT und einer Kontaktfläche von A ergibt sich der Wärmestrom durch: (*Jaros, Nussbaumer, & Nussbaumer, 2012, S. 16*)

$$I = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{F.18})$$

I ... Wärmestrom [I] = W α ... Wärmeübergangskoeffizient [α] = $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ A ... Größe der Kontaktfläche [A] = m^2 ΔT ... Temperaturdifferenz [ΔT] = K

Der Wärmeübergangskoeffizient ist ein Proportionalitätsfaktor für die Größe des Wärmestroms an der Grenzschicht zwischen zwei Körpern. Er hängt unter anderem von der Strömungsgeschwindigkeit des Fluids, der Strömungsart (turbulent, laminar), der Oberflächenbeschaffenheit des festen Körpers und der spezifischen Wärmekapazität der beiden Körper ab.

3.6.3 Wärmedurchgang

Fließt Wärme von einem Fluid durch einen Festkörper zu einem anderen Fluid, nennt man diesen Prozess *Wärmedurchgang*. Dieser ist eine Kombination aus zwei Wärmeübergängen (jeweils ein Wärmeübergang pro Festkörper-Fluid Grenzfläche) und Wärmeleitung innerhalb des Festkörpers. Die Einflüsse des Wärmeübergangs und der Wärmeleitung werden in der

praktischen Anwendung im sogenannten *Wärmedurchgangskoeffizienten* oder *U-Wert* zusammengefasst: (Jaros, Nussbaumer, & Nussbaumer, 2012, S. 16)

$$I = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{F.19})$$

I... Wärmestrom [I] = W U... U-Wert der Wand [U] = $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ A... Größe der Kontaktfläche [A] = m^2 ΔT ... Temperaturdifferenz [ΔT] = K

Ein Beispiel für den Wärmedurchgang wäre eine Hausmauer, welche die Raumluft von der Außenluft trennt. Hier findet zuerst ein Wärmeübergang an der Grenzschicht der Raumluft zur Hausmauer, danach Wärmeleitung in der Hausmauer und anschließend Wärmeübergang an der Grenzschicht der Hausmauer und der Außenluft statt.

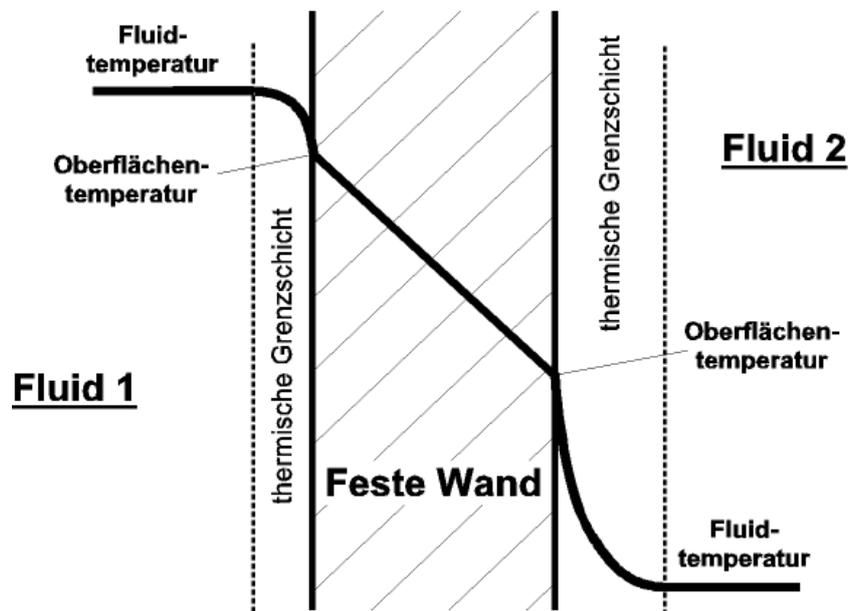


Abbildung 22: Wärmedurchgang an einer Wand;
<https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmedurchgang>

3.6.4 Wärmeströmung

Als Wärmeströmung (*Konvektion*) wird Wärmetransport bezeichnet, der mit einem Stofftransport verbunden ist. Bei dieser Form von Wärmeübertragung sind Atome und Moleküle nicht fixiert, sondern bewegen sich im Raum. Daher findet Wärmeströmung nicht in Festkörpern, sondern in Fluiden (Gasen und Flüssigkeiten) statt. In der Natur findet man diese

Art von Wärmetransport zum Beispiel in der Atmosphäre bei Luftzirkulationen oder bei Meeresströmungen. (Tipler & Mosca, 2014, S. 638)

Ein einfaches Beispiel für Wärmeströmung ist die Luft eines Raumes, die in der Nähe eines Heizkörpers erwärmt wird:

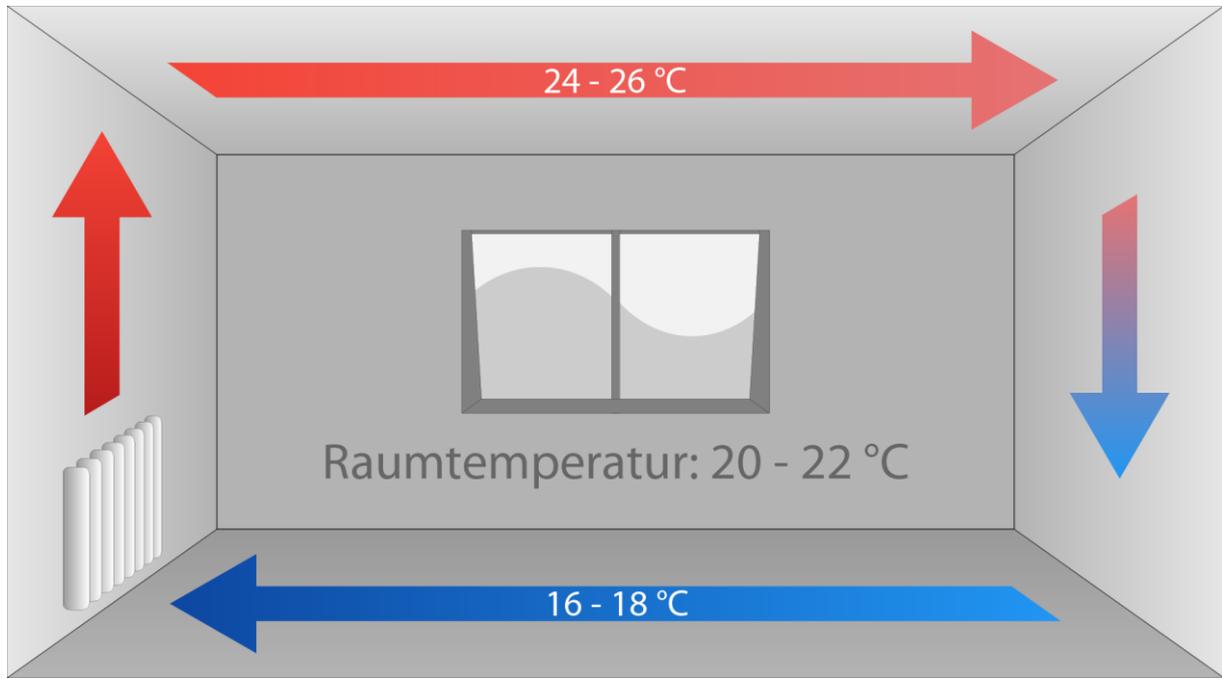


Abbildung 23: Konvektion von Luft in einem beheizten Raum;
<https://ennergypowerbox.de/infrarotheizung-vergleich.php>

Die durch den Heizkörper erwärmte Luft dehnt sich aus und steigt aufgrund ihrer geringeren Dichte im Vergleich zur restlichen Luft im Raum auf. Die warme Luft wandert nun zur Decke und diese entlang und kühlt sich an dieser wieder ab, wodurch sie sich wieder zusammenzieht. Die nun wieder abgekühlte Luft sinkt aufgrund größerer Dichte langsam wieder nach unten. Durch den Unterdruck, den die nach oben strömende Luft in der Nähe des Heizkörpers erzeugt, wird die Luft vom Raum von unten zum Heizkörper hingezogen und der Kreislauf beginnt wieder von vorne.

3.6.5 Wärmestrahlung

Jeder reale Körper emittiert und absorbiert elektromagnetische Strahlung (*Wärmestrahlung*). Befindet er sich in thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung, so emittiert er genauso viel Wärmestrahlung, wie er absorbiert. Fällt elektromagnetische Strahlung auf einen dunklen

Körper so absorbiert er den größten Teil davon, während farbige Körper einen Großteil davon reflektieren. Die von einem Körper bei Wärmestrahlung emittierte bzw. absorbierte Strahlungsleistung ist proportional zu seiner Oberfläche und zur vierten Potenz seiner Temperatur bzw. der Umgebungstemperatur. Dieser Zusammenhang wird durch das *Stefan-Boltzmann'sche Gesetz* beschrieben: (Tipler & Mosca, 2014, S. 638-639)

$$P_{\varepsilon} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (\text{F.20})$$

$$P_{\alpha} = \alpha \cdot \sigma \cdot A \cdot T_0^4 \quad (\text{F.21})$$

P_{ε} ... emittierte Strahlungsleistung [P_{ε}] = W P_{α} ... absorbierte Strahlungsleistung [P_{α}] = W
 ε ... Emissionskoeffizient [ε] = dimensionslos α ... Absorptionskoeffizient
 $[\alpha]$ = dimensionslos σ ... Stefan-Boltzmann-Konstante [σ] = $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ A ... Oberfläche des Körpers [A] = m^2 T ... Temperatur des Körpers [T] = K T_0 ... Umgebungstemperatur [T_0] = K

Wieviel Strahlung ein Körper emittiert bzw. absorbiert wird vom jeweiligen Emissions- und Absorptionskoeffizienten ab. Diese hängen im Allgemeinen von den Materialeigenschaften des Körpers, der Frequenz der Strahlung und der Strahlungsrichtung ab. (Tipler & Mosca, 2014, S. 639)

Aus der Formel F.20 ist zusätzlich ersichtlich, dass nur ein Körper mit einer Temperatur von 0 K keine Wärme ausstrahlen würde. Da es jedoch keinen Körper mit dieser Temperatur gibt, folgt die erste Aussage dieses Kapitels, dass jeder reale Körper Wärmestrahlung emittiert.

Die Wärmestrahlung eines Körpers umfasst ein weites Spektrum an Wellenlängen und besitzt ein temperaturabhängiges Maximum. Bei welcher Wellenlänge das Maximum der Strahlungsintensität liegt, kann mit Hilfe des *Wien'schen Verschiebungsgesetzes* bestimmt werden: (Tipler & Mosca, 2014, S. 639)

$$\lambda_{max} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T} \quad (\text{F.22})$$

λ_{max} ... Wellenlänge bei der die Strahlungsintensität am größten ist [λ_{max}] = mm

K... Kelvin T ... Temperatur [T] = K

Der Zusammenhang von Wellenlänge, Strahlungsintensität und der Temperaturabhängigkeit des Strahlungsmaximums ist in Abbildung 24 schematisch dargestellt.

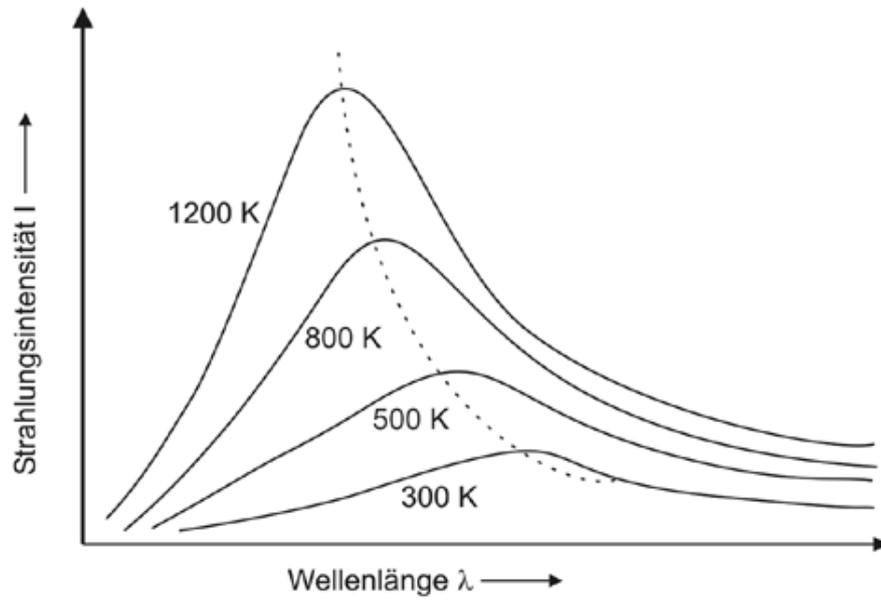


Abbildung 24: Diagramm: Wien'sches Verschiebungsgesetz;
<http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/10/waermetransport/waermestrahlung/waermestrahlung.vlu/Page/vsc/de/ch/10/waermetransport/waermestrahlung/energiebilanz/energiebilanz.vscml/Supplement/1.html>

Experiment 15: Wärmeleitung („Die unterbrochene Flamme“)

Materialien:

- Metallgitter
- Feuerzeug
- Haltevorrichtung



Abbildung 25: Unterbrechung einer Flamme durch Wärmeleitung eines Drahtgitters; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für diesen Versuch befestigt man zuerst ein Metallgitter in einer Haltevorrichtung oder hält es mit einer Zange. Anschließend lässt man unterhalb des Gitters, durch leichten Druck auf das Feuerzeug, kontinuierlich das Gas im Inneren des Feuerzeugs entweichen. Das Feuerzeuggas wird nun oberhalb des Gitters mit Hilfe eines zweiten Feuerzeugs entzündet und man kann beobachten, dass die Flamme nur oberhalb des Metallgitters brennt.

Physikalischer Hintergrund

Das Gas oberhalb des Gitters wird durch die große Wärmezufuhr der Flamme des zweiten Feuerzeugs entzündet und es bildet sich eine Flamme. Die Wärme der so erzeugten Flamme wird durch das Gitter abgeleitet, wodurch dem Gas unterhalb des Gitters nicht genug Wärmeenergie zur Verfügung steht, um sich zu entzünden. Dieser Funktionsweise bedient sich die „Davy’sche Grubenlampe“.

Dieser Versuch kann auch umgekehrt durchgeführt werden. Entzündet man ein Feuerzeug, so kann man die entstandene Flamme mit Hilfe des Gitters auch von oben zusammendrücken. Dabei wird die Flamme unter dem Gitter zusammengestaucht und gelangt nicht durch das Gitter hindurch, da die Wärmeenergie der Flamme durch das Gitter abgeleitet wird und daher nicht zur Entzündung des Feuerzeuggases oberhalb des Gitters ausreicht.

Experiment 16: Wärmeleitung unterschiedlicher Materialien

Materialien:

- Eiswürfel
- Aluminiumoberfläche
- Kunststoffoberfläche

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/iO06ScR-110>

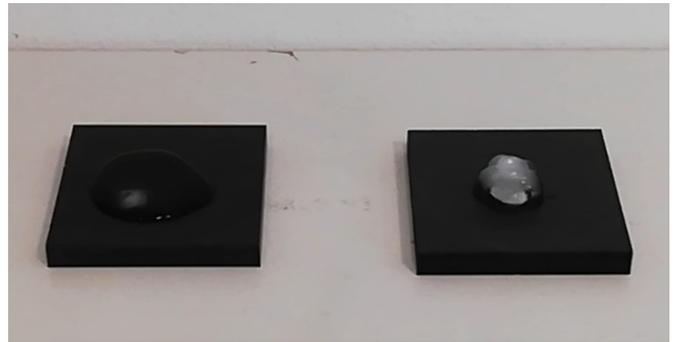


Abbildung 26: Schmelzende Eiswürfel auf unterschiedlichen Oberflächen; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

In diesem Versuch wird die Wärmeleitung von verschiedenen Materialien demonstriert. Dazu benötigt man eine Kunststoffplatte, sowie eine Aluminiumplatte, die möglichst gleich dick sein sollten. Um den Effekt zu verstärken, kann man beide Platten schwarz lackieren. Dadurch erkennt der Beobachter auf den ersten Blick nicht, dass es sich um zwei unterschiedliche Materialien handelt. Auf beide Platten wird nun jeweils ein Eiswürfel gelegt und das Verhalten der Eiswürfel beobachtet. Man erkennt, dass ein Eiswürfel deutlich früher und schneller schmilzt als der andere.

Physikalischer Hintergrund

Der Eiswürfel, der auf die Aluminiumplatte gelegt wurde, schmilzt viel schneller als jener, der auf die Kunststoffplatte gelegt wurde. Die Ursache liegt hier in der besseren Wärmeleitung der Aluminiumplatte. Diese leitet die Wärme der Umgebung viel besser zum Eiswürfel, als es die Kunststoffplatte tut. Dadurch erwärmt sich der Eiswürfel auf der Aluminiumplatte schneller und stärker, sodass er schlussendlich früher und schneller schmilzt.

Experiment 17: Wärmeleitung verschiedener Drähte

Materialien:

- Metalldrähte: Kupfer Ø 1,2 mm
Kupfer Ø 0,8 mm
Eisen Ø 1,2 mm
Eisen Ø 0,8 mm
- Kerzen
- Wachs
- Feuerzeug

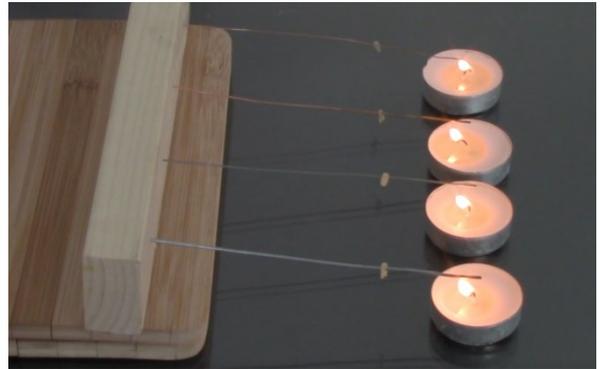


Abbildung 27: Drähte unterschiedlichen Materials mit Wachskugeln unter Wärmezufuhr durch Kerzenflammen; eigenes Bild

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/0Zc79htofEM>

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für diesen Versuch wird von jeder der vier Drahtsorten jeweils ein gleich langes Stück abgeschnitten. Anschließend bildet man aus dem flüssigen Kerzenwachs einer Kerze kleine Wachskugeln und bringt diese auf den Drähten an. Dabei ist zu beachten, dass die Wachskugeln alle denselben Abstand von einem Ende des Drahtstücks haben. Nun befestigt man diese Drahtstücke an einem beliebigen Gegenstand (hier: Holzblock), sodass die Enden, von denen die Wachskugeln den gewählten Abstand haben, in die gleiche Richtung zeigen. Diese Drahtenden werden nun so positioniert, dass jedes Ende die Flamme einer Kerze berührt. Man kann beobachten, dass die Zeit nach der die Wachskugeln der einzelnen Drähte zu schmelzen beginnen, sehr unterschiedlich ist.

Physikalischer Hintergrund

Der Grund für die unterschiedlichen Zeiten, die die einzelnen Wachskugeln brauchen, um zu schmelzen, liegt an dem Material und der Dicke der Drähte. Dies wird ersichtlich, wenn man sich Formel 17 für der Wärmeleitung genauer ansieht. Formt man diese auf den Wärmestrom I um, so erkennt man, dass dieser nur von der Querschnittsfläche A der Drähte und der Wärmeleitfähigkeit λ des Materials abhängt, denn der Temperaturunterschied ΔT und die Länge

l vom Ende des Drahtes bis hin zur Wachskugel sind in allen vier Fällen identisch. Kupfer hat eine höhere Wärmeleitfähigkeit als Eisen und die dickeren Drähte desselben Materials eine größere Querschnittsfläche. Daher schmelzen die Wachskugeln auf dem Kupferdraht schneller als auf dem Eisendraht derselben Dicke und die Kugeln auf dem dicken Draht früher als jene auf dem dünnen Draht desselben Materials.

Experiment 18: Geringe Wärmeleitfähigkeit von Wasser

Materialien:

- Reagenzglas
- Draht
- Eis
- Wasser
- Laborgasbrenner

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/EMET5rP2yKA>



Abbildung 28: Eis, Wasser und Wasserdampf zeitgleich in einem Reagenzglas; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Die erste Aufgabe, um diesen Versuch durchzuführen, ist es, aus einem Stück Draht eine Spirale zu bauen, welche in das Reagenzglas passt. In das Reagenzglas wird zuerst zu einem Drittel Eis gegeben, auf welchem die Drahtspirale platziert wird. Die Drahtspirale dient dazu, dass das Eis am Boden des Glases bleibt und nicht aufsteigt. Anschließend befüllt man das Reagenzglas mit Wasser, sodass dieses mindestens zu zwei Drittel gefüllt ist. Das Reagenzglas befestigt man nun in einer Haltevorrichtung, oder hält es mit einer Zange, während man mit einem Laborgasbrenner das Wasser am offenen Ende des Glases erhitzt. Man kann schon nach kurzem Erhitzen das Sieden des Wassers erkennen und Wasserdampf aufsteigen sehen, während sich noch immer Eis und Wasser im Reagenzglas befinden.

Physikalischer Hintergrund

Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit von Wasser kann das siedende Wasser die Wärmeenergie nur sehr langsam an das nicht-siedende Wasser leiten. Analog verhält es sich bei dem nicht-siedenden Wasser und dem darunter liegenden Eis. Aus diesem Grund kann man im Reagenzglas sowohl Eis, nicht-siedendes Wasser und siedendes Wasser gleichzeitig und direkt nebeneinander beobachten.

Experiment 19: Konvektion von Luft

Materialien:

- Papierspindel
- Faden
- Klebeband
- Kerze
- Feuerzeug



Abbildung 29: Papierspindel oberhalb einer Kerzenflamme; eigenes Bild

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/ol6XIWevOJI>

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für dieses Experiment wird eine Papierspindel aus einem Blatt Papier ausgeschnitten und anschließend mit Hilfe eines Fadens wie in Abbildung 29 dargestellt aufgehängt. Platziert man nun eine brennende Kerze unter der Papierspindel, so kann man erkennen, dass sich die Spirale zu drehen beginnt.

Physikalischer Hintergrund

Sobald man die Kerze unter der Papierspindel platziert, beginnt die Flamme die Luft oberhalb der Kerze zu erwärmen. Die heiße Luft dehnt sich aus, besitzt dadurch eine geringere Dichte und steigt auf. Die nun aufsteigende Luft strömt entlang des Papierspiralarms, wodurch sich die Papierspindel zu drehen beginnt.

Experiment 20: Wärmeströmung einer Flüssigkeit

Materialien:

- Rechteckiges Glasrohr
- Wasser
- Tinte
- Kerze

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/LmmejfqGAdM>

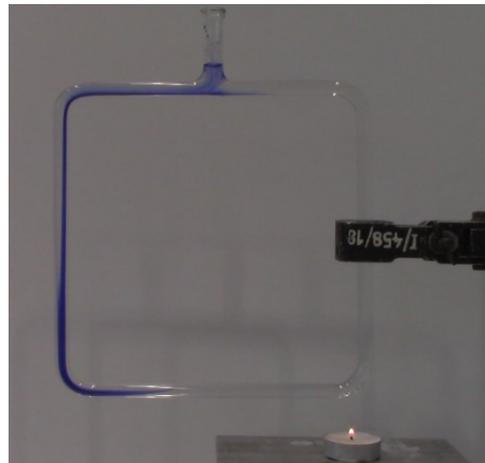


Abbildung 30: Konvektion von Tinte in einem mit Wasser gefüllten, rechteckigen Glasrohr; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Um diesen Versuch durchzuführen befüllt man ein durchsichtiges Rohr (in diesem Beispiel ein rechteckiges Glasrohr) mit Wasser. Sobald das Rohr vollgefüllt ist, tropft man ein paar Tropfen Tinte in das Wasser, sodass die Tinte gut erkennbar ist. Anschließend hält man ein Ende des Rohres über eine Flamme, um das Rohr und das darin enthaltene Wasser an dieser Stelle zu erwärmen. Nach kurzer Zeit kann man erkennen, dass die Tinte im Wasser beginnt durch das Rohr zu strömen.

Physikalischer Hintergrund

Das Wasser im Rohr, welches sich direkt über der Flamme befindet, wird durch die Flamme erwärmt und dehnt sich aufgrund dieser Wärmezufuhr aus. Gleichzeitig verringert sich die Dichte des Wassers in diesem Bereich im Vergleich zum restlichen Wasser im Rohr. Das Wasser mit der geringeren Dichte steigt auf und schiebt so das restliche Wasser im Rohr weiter. Die entstandene Strömung zieht auch die Tinte mit sich und so geschieht es, dass die Tinte langsam durch das Rohr wandert.

Experiment 21: Wärmestrahlung - Hohlspiegel

Materialien:

- Hohlspiegel
- Glühlampe
- Thermometer
- Haltevorrichtung



Abbildung 31: Anordnung zur Fokussierung der Wärmestrahlung einer Glühlampe auf ein Thermometer; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/g0lsnR7H4VE>

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Bevor man den Versuchsaufbau wie in Abbildung 31 gezeigt nachbauen kann, muss man zuerst den Brennpunkt des Hohlspiegels herausfinden. Zuerst wird der Hohlspiegel an einer Position fixiert und ihm eine Glühlampe gegenübergestellt. Die Glühlampe wird nun eingeschaltet und der Brennpunkt des Spiegels mit Hilfe eines Papierblattes bestimmt. Dazu führt man das Blatt zwischen dem Hohlspiegel und der Glühlampe hin und her und sucht den Punkt, an dem die Lichtstrahlen der Glühlampe durch den Spiegel fokussiert werden. Hat man diese Stelle gefunden, so bringt man dort die Spitze des Thermometers an. Nun kann man die Intensität der Glühlampe verstellen und die Temperatur am Thermometer beobachten. Man erkennt, dass sich die Temperatur mit zunehmender Intensität ändert.

Physikalischer Hintergrund

Durch den Hohlspiegel werden Teile der Wärmestrahlung der Glühlampe in einem Punkt fokussiert. Positioniert man in diesem Punkt ein Thermometer, so kann man diese Wärmestrahlung der Glühlampe messen. Je höher man die Intensität der Glühlampe einstellt, desto größer ist auch die Leistung ihrer Wärmestrahlung und auch die am Thermometer gemessene Temperatur.

Experiment 22: Wärmestrahlung – Leslie-Würfel

Materialien:

- Leslie Würfel
- Strahlungsthermometer
- Heißes Wasser
- Thermometer



Abbildung 32: Messung der Wärmestrahlung einer Seite des Leslie-Würfels; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Leslie-Würfel ist aus sechs Metallplatten aufgebaut: einer Bodenplatte, einer mit einer runden Öffnung versehenen Deckplatte und vier Seitenwänden (schwarz, matt silbrig, glänzend silbrig und glänzend kupferfärbig). Für den Versuch wird der Würfel mit heißem Wasser gefüllt, mit dem Deckel verschlossen und durch die runde Öffnung im Deckel ein Thermometer eingeführt. Das Thermometer zeigt die tatsächliche Temperatur des Wassers im Inneren an (85,9 °C). Nun werden nacheinander alle vier Seitenwände des Leslie-Würfels mit einem Strahlungsthermometer gemessen. Man beobachtet unterschiedliche Temperaturen der Seitenwände. Die schwarze Seitenwand emittiert am meisten Wärmestrahlung und misst 85 °C, die silbrig-matte Seitenwand misst 56 °C und die beiden glänzenden Seitenwände messen jeweils 26 °C.

Physikalischer Hintergrund

Die vier Seitenwände des Leslie Würfels emittieren aufgrund ihrer unterschiedlichen Oberflächen Beschaffenheiten unterschiedlich viel Wärmestrahlung. Dieser Zusammenhang wird aus Formel F.20 ersichtlich. Die schwarze Oberfläche hat den größten Emissionskoeffizienten (nahe $\varepsilon = 1$) und emittiert dadurch die größte Strahlungsleistung. Die silbrig-matte Oberfläche besitzt den zweitgrößten Emissionskoeffizienten, während die glänzenden Oberflächen den kleinsten Emissionskoeffizienten besitzen und dadurch am wenigsten Strahlungsleistung emittieren.

Experiment 23: Wärmestrahlung auf unterschiedliche Oberflächen

Materialien:

- Behälter mit unterschiedlichen Oberflächen
- Thermometer
- Wasser
- Wärmelampe (oder Sonne)



Abbildung 33: Temperaturmessung von Wasser in Behältern mit unterschiedlichen Oberflächen nach 15-minütiger Bestrahlung durch eine Wärmelampe; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Um diesen Versuch durchzuführen wird kaltes Wasser derselben Temperatur (15 °C) in drei Behälter, die alle eine unterschiedliche Oberfläche (in dieser Durchführung: mattschwarz, matt weiß, silbrig glänzend) aufweisen, gefüllt. Anschließend werden alle drei Behälter mit Hilfe einer Wärmelampe für dieselbe Zeit lang beleuchtet, oder an sonnigen Tagen in die Sonne gestellt. In dieser Durchführung wurden alle drei Behälter jeweils für 15 Minuten mit einer Wärmelampe bestrahlt. Am Ende der Zeitspanne wird die Temperatur des Wassers der drei Behälter erneut gemessen. Man kann sehen, dass sich die Temperaturen unterscheiden. Am Ende der Durchführung hatte das Wasser im schwarzen Behälter eine Temperatur von 33 °C, das Wasser im weißen Behälter eine Temperatur von 22 °C und die Temperatur des Wassers im silbrig glänzenden Behälter betrug 19 °C.

Physikalischer Hintergrund

Aufgrund der unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheit absorbieren die drei Behälter unterschiedlich viel Wärmestrahlung. Dies liegt daran, dass sich der Absorptionskoeffizient der Oberflächen der Behälter unterscheiden (F.21). Die schwarze Oberfläche hat einen größeren Absorptionskoeffizienten (nahe $\alpha = 1$) als die weiße Oberflächen und die weiße Oberfläche einen größeren als die silbrig-glänzende Oberfläche. Dadurch ist die Temperatur des Wassers im schwarzen Behälter am größten, im weißen Behälter am zweitgrößten und im silbrig glänzenden Behälter am kleinsten.

Experiment 24: Wien'sches Verschiebungsgesetz

Materialien:

- Glühlampe
- Spektrometer (Ocean Optics)
- Laptop oder PC
- Programm für die Auswertung
- Haltevorrichtung
- Transformator
- Kabel

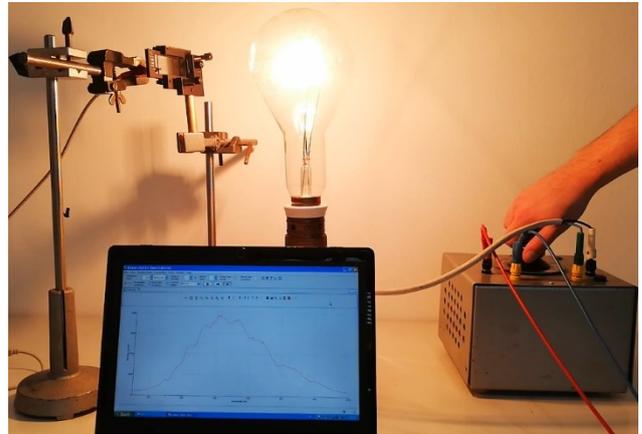


Abbildung 34: Aufzeichnung der Wellenlängenverschiebung der Strahlung einer Glühlampe durch Erhöhung der Strahlungsintensität; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Link und QR – Code zum Video:



https://youtu.be/cC_ib_-jnSM

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Um dieses Experiment durchzuführen, wird mit Hilfe einer Haltevorrichtung ein Ocean Optics Spektrometer auf eine Glühlampe gerichtet und an einen Computer mit einem Programm für die Auswertung des Spektrums angeschlossen. Die Glühlampe wird mit Kabeln an den Transformator angeschlossen, um die Temperatur und damit die Helligkeit des Glühlampendrahtes regeln zu können. Nun regelt man den durch die Glühwendel fließenden Strom mit Hilfe des Transformators langsam nach oben, während man den Verlauf des Spektrums am Computer aufzeichnet. Man kann beobachten, dass sich das Maximum der Strahlungsleistung zu einer kleineren Wellenlänge verschiebt (im Video von etwa 680 nm zu 620 nm).

Physikalischer Hintergrund

Das Wien'sche Gesetz (F.22) besagt, dass die Wellenlänge, bei der das Maximum der Strahlungsleistung vorliegt, indirekt von der Temperatur abhängt. Durch das Aufdrehen des Transformators erhöht sich die Temperatur des Glühlampendrahtes, wodurch die Wellenlänge, bei der das Strahlungsmaximum liegt, kleiner wird.

3.7 ENTROPIE UND DER ZWEITE HAUPTSATZ DER WÄRMELEHRE

3.7.1 *Reversible und irreversible Prozesse*

In der Physik wird oft zwischen *reversiblen* und *irreversiblen* Vorgängen unterschieden. Unter einem reversiblen Vorgang versteht man einen Vorgang, der von sich aus auch rückwärts ablaufen könnte. Ein Beispiel für einen reversiblen Vorgang wäre ein idealer elastischer Stoß. Würde man eine blaue Billardkugel aus einer Richtung A schräg auf eine ruhende, rote Billardkugel schießen, so würden sich beide Kugeln nach dem Aufprall in verschiedene Richtungen B und C weiter bewegen. Umgekehrt könnte es jedoch genauso gut ablaufen, dass beide Kugeln aus den verschiedenen Richtungen B und C kommend aufeinanderprallen, die rote Kugel stehen bleiben würde und sich die blaue Kugel in Richtung A bewegen würde. Dieser Vorgang wäre also reversibel. Solch ein Vorgang ist natürlich nur als ideales Modell anzusehen. In der Realität würde Energie durch die Reibung der Kugeln am Boden und während des Zusammenstoßes in Wärme und Verformungsarbeit umgewandelt werden und die Kugeln würden die exakt gleiche Ausgangsposition nicht wieder erreichen.

Von einem irreversiblen Vorgang spricht man, wenn ein Prozess von selbst nur in eine Richtung ablaufen würde. Ein Beispiel für einen irreversiblen Prozess wäre ein Glas, das aus einer gewissen Höhe auf den Boden fällt und zerspringt. Die kinetische Energie des hinunterfallenden Glases wird durch Verformungsarbeit in innere Energie des Glases und des Bodens umgewandelt. Der umgekehrte Prozess, dass das zersprungene Glas einen Teil seiner inneren Energie umwandelt, um sich wieder zusammenzufügen und dann wieder in die ursprüngliche Höhe zurückspringt ist so unwahrscheinlich, dass er praktisch niemals beobachtet wird. Daher bezeichnet man diesen Prozess als irreversibel. Jeder in der Natur vorkommende Prozess ist irreversibel.

3.7.2 *Die Entropie*

Die *Entropie* ist eine physikalische Zustandsgröße, die mit S bezeichnet wird und die Einheit $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ besitzt. Das Konzept der Entropie ist eines der am schwierigsten zu erklärenden Konzepte

in der Thermodynamik. Aufgrund dessen wird hier versucht, eine schulrelevante Erklärung auszuarbeiten. Dazu wird mit einem Gedankenexperiment begonnen:

Man stelle sich eine Box vor, in der ein Gasteilchen eingeschlossen ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Gasteilchen auf der linken Hälfte der Box befindet, ist 50 % also $1/2$. Betrachtet man nun zwei Gasteilchen in der Box, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich beide auf der linken Hälfte der Box befinden nur noch 25% also $1/4$. Bei drei Teilchen beläuft sich die Wahrscheinlichkeit auf 12,5% also $1/8$. Allgemein kann man sagen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass sich N Teilchen in der Box auf derselben Hälfte befinden, bei $(1/2)^N$ liegt. Betrachtet man nun etwa ein Mol Luft, was 10^{24} Teilchen entsprechen würde, würde die Wahrscheinlichkeit für das Antreffen aller Teilchen auf derselben Hälfte der Box bei etwa 1 zu $10^{181284522963288121091626}$ liegen. (Apolin, 2008, S. 79)

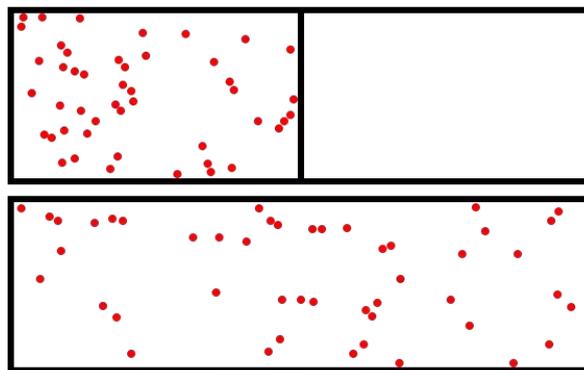


Abbildung 35: Verteilung von Gasteilchen in einer Box;
<https://de.quora.com/Was-versteht-man-in-einfachen-Worten-unter-Entropie>

In Abbildung 35 ist die Verteilung eines Gases in einer Box dargestellt. Wird die Trennwand entfernt, so verteilt sich das Gas gleichmäßig innerhalb der Box. Theoretisch ist es nicht unmöglich, dass sich alle Teilchen zu einem gewissen Zeitpunkt nach der Entfernung der Trennwand auf einer Hälfte der Box sammeln, jedoch ist dieser Zustand äußerst unwahrscheinlich. Man kann es so formulieren, dass sich die Teilchen nach dem Entfernen der Trennwand in einer größeren Unordnung befinden, als sie es vorher waren. Das Maß für die Größe dieser Unordnung wird als *Entropie* bezeichnet. (Apolin, 2008, S. 79)

Ganz ähnlich zu dem Beispiel mit den Gasteilchen in der Box verhält es sich, wenn man zwei Körper mit unterschiedlicher Temperatur in Kontakt bringt. Die Teilchen im wärmeren Körper besitzen mehr ungeordnete Bewegungsenergie als der kältere Körper. Bringt man diese beiden Körper nun in Kontakt, so verteilt sich die ungeordnete Bewegungsenergie gleichmäßig und die beiden Körper haben nach einer bestimmten Zeit dieselbe Temperatur. Grund dafür ist, dass der Zustand der gleichmäßigen Verteilung der Bewegungsenergie, der wahrscheinlichste ist. Es

könnte theoretisch bei dem Kontakt dazu kommen, dass der wärmere Körper Bewegungsenergie vom kälteren bekommt, sich dadurch noch weiter erwärmt und der kältere sich noch weiter abkühlt, jedoch ist dieser Zustand so unwahrscheinlich, dass er in der Realität nie auftritt. (Apolin, 2008, S. 79)

3.7.3 Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre

Die Aussage des *zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre* ist es, dass die Entropie eines geschlossenen Systems niemals kleiner wird, sondern immer den größtmöglichen Wert anstrebt. In der Lehre der Thermodynamik im Schulkontext wird aufgrund einfacherer Anschauung häufig auch folgende abgeleitete Aussage verwendet: Wärme fließt von selbst immer von einem warmen zu einem kalten Körper, niemals umgekehrt. Als Beispiel dafür stelle man sich einen Eiswürfel in einem Raum mit Luft auf Zimmertemperatur vor. Die Raumluft gibt Wärme an den Eiswürfel ab, der diese aufnimmt und zu schmelzen beginnt. Wärme ist also von der warmen Luft auf den kalten Eiswürfel übergegangen. Umgekehrt würde es jedoch praktisch niemals passieren, dass der Eiswürfel von selbst Wärmeenergie an die Umgebungsluft abgibt, sich dadurch noch weiter abkühlt und die Luft um ihn herum erwärmt.

3.8 DER DRITTE HAUPTSATZ DER WÄRMELEHRE

Der *dritte Hauptsatz der Wärmelehre* besagt, dass es unmöglich ist, ein Objekt auf eine Temperatur von 0 K abzukühlen. (Tipler & Mosca, 2014, S. 623)

Experiment 25: Veranschaulichung der Entropie

Materialien:

- Salz
- Pfeffer
- Papier

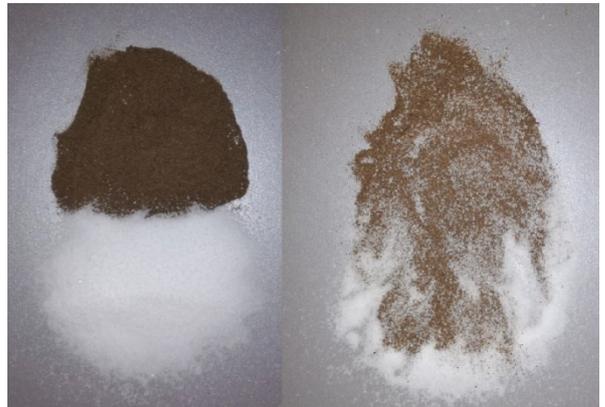


Abbildung 36: Veranschaulichung der Entropie durch Vermischen von Salz und Pfeffer; eigenes Bild

Versuchsdurchführung und Erklärung

Dieser Versuch dient zur Veranschaulichung des doch sehr komplexen Themas der Entropie. Für die Durchführung platziert man je einen Haufen Salz und Pfeffer nebeneinander auf einem Blatt Papier. Man erklärt den Beobachtern, dass sich das Salz-Pfeffer System aufgrund der geordneten Anordnung in einem Zustand geringer Entropie befindet. Anschließend vermischt man beide Haufen und fährt mit der Erklärung fort. Durch das Vermischen der beiden Haufen ist die Entropie des Systems gestiegen. In diesem Zustand ist es sehr viel einfacher, die Entropie zu erhöhen, also das Salz-Pfeffer Gemisch noch weiter zu vermischen, als die Entropie zu verringern, also das Salz-Pfeffer Gemisch wieder in zwei getrennte Haufen aufzuteilen. Physikalisch gesprochen würde es mehr Arbeit benötigen die Salz- und Pfefferkörner der Mischung zu separieren, als sie weiter zu vermischen. Für ein physikalisches System ist es also sehr viel einfacher einen Zustand größerer Entropie einzunehmen, als seine Entropie zu verringern.

3.9 PHASENÜBERGÄNGE

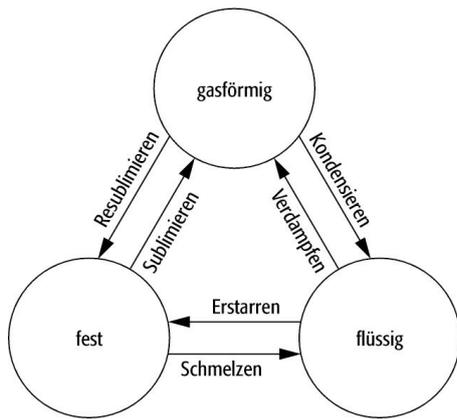
3.9.1 Aggregatzustände

Jeder Stoff kommt in der Natur in einem von vier sogenannten *Aggregatzuständen* vor: fest, flüssig, gasförmig (die klassischen Aggregatzustände) oder als Plasma. Wasser kann beispielsweise als Eis (fest), als flüssiges Wasser (flüssig), oder als Wasserdampf (gasförmig) vorkommen. Führt man dem Wasserdampf noch weiter thermische Energie zu, so ionisiert der Wasserdampf ab einem gewissen Punkt und er geht in den Plasmazustand über. Es gibt noch weitere spezielle Aggregatzustände, die jedoch ausschließlich in Laboren unter extremen Bedingungen erzeugt werden konnten (z.B. das Bose-Einstein Kondensat).

Die drei klassischen Aggregatzustände unterscheiden sich untereinander durch ihre Energie, ihre molekulare Struktur und die Art der Teilchenbewegung. Bei einem Feststoff sind die Teilchen aufgrund starker Anziehungskraft im Festkörper sehr nahe beieinander und in einer Gitterstruktur angeordnet, in der sie sich nur schwach um ihre Ruhelage bewegen (schwingen). Teilchen in Flüssigkeiten hingegen, besitzen keine fixe Gitterstruktur mehr. Sie sind also nicht mehr an einem Ort fixiert, sondern können sich aneinander vorbeibewegen. Sie besitzen jedoch weiterhin eine Anziehung untereinander, nur ist diese viel schwächer als bei Festkörpern. Bei gasförmigen Stoffen ist die Bewegung der Teilchen schließlich so stark, dass es praktisch keine Anordnung mehr gibt. Die Teilchen bewegen sich quasi frei im Raum. Auch die anziehenden Kräfte der Teilchen untereinander sind kaum vorhanden.

3.9.2 Phasenübergänge und latente Wärme

Von einem *Phasenübergang* spricht man, wenn sich die Phase eines Stoffes in eine andere umwandelt (z.B. Eis schmilzt zu Wasser). Zu den wichtigsten Phasenübergängen gehören das Schmelzen (fest zu flüssig), das Erstarren (flüssig zu fest), das Verdampfen (flüssig zu gasförmig), das Kondensieren (gasförmig zu flüssig), das Sublimieren (fest zu gasförmig) und das Resublimieren (gasförmig zu fest). Es folgen nun Beispiele für die einzelnen Übergänge, die in Abbildung 37 auch schematisch dargestellt werden:



- Schmelzen: Eis wird zu Wasser
- Erstarren: Wasser wird zu Eis
- Verdampfen: Wasser wird zu Wasserdampf
- Kondensieren: Wasserdampf wird zu Wasser
- Sublimieren: Eis wird zu Wasserdampf (Schnee geht direkt in Wasserdampf über)
- Resublimieren: Wasserdampf wird zu Eis (Raureif)

Abbildung 37: Phasenübergänge;
<https://www.micrecol.de/verbundstoffe/sublimation-resublimation-1/>

Geht ein Stoff von einer Phase in eine andere über, so ist damit immer eine Abgabe oder Aufnahme von Wärme verbunden. In Abbildung 38 ist ein Diagramm dargestellt, welches die Temperaturerhöhung und die damit verbundenen Phasenübergänge unter Zufuhr von Wärme von Eis bis Wasserdampf zeigt.

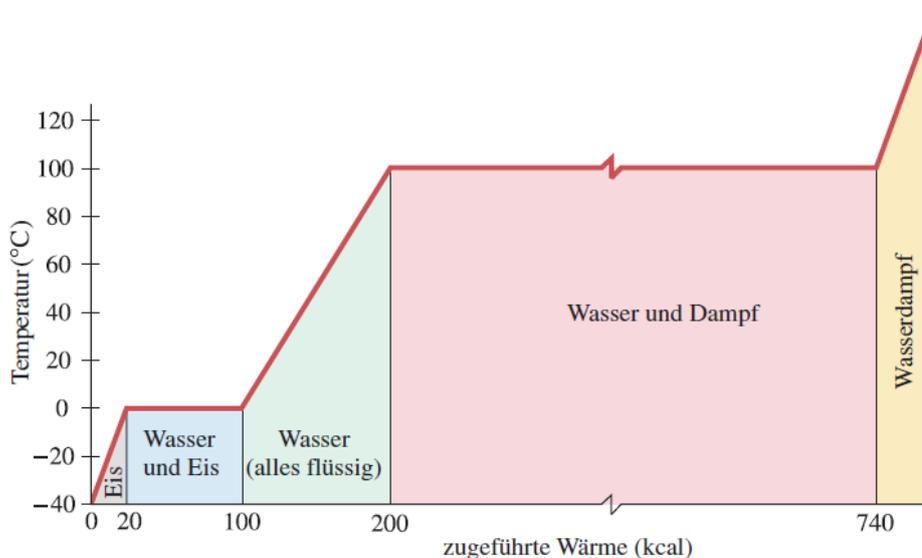


Abbildung 38: Phasenübergänge und Temperaturerhöhung von Wasser durch Zufuhr von Wärme;
 (Giancoli, 2009, S. 659)

Es ist klar ersichtlich, dass die Temperatur des Eises bei einer Zufuhr von Wärme zuerst von -40 °C bis etwa 0 °C linear ansteigt (0-20 kcal). Die zugeführte Wärmeenergie wird demnach zur Erhöhung der mittleren Geschwindigkeit der Teilchen und damit zur Erhöhung der Temperatur genutzt. Beim Phasenübergang von fest zu flüssig bemerkt man jedoch keinen Temperaturanstieg mehr, obwohl weiterhin Wärme zugeführt wird (20-100 kcal). In diesem Bereich wird die Wärmeenergie offensichtlich nicht zur Temperaturerhöhung genutzt. Was geschieht nun aber mit der zugeführten Wärme?

Um den Phasenübergang von fest zu flüssig zu ermöglichen, muss Arbeit gegen die Anziehung der Teilchen aufgebracht werden, da diese in Flüssigkeiten viel schwächer gebunden sind als in Festkörpern. Man muss sozusagen Energie aufbringen, um die Teilchen aus ihrer stark gebundenen Gitterstruktur im Festkörper herauszulösen. Um dies zu bewerkstelligen wird eben diese zugeführte Wärmeenergie benutzt. Das bedeutet, dass in Bereichen wo ein Phasenübergang stattfindet, die Wärmeenergie nicht zur Temperaturerhöhung des Körpers führt, sondern zur Auflösung der Bindungen der Teilchen genutzt wird. Aufgrund dessen sieht man im Diagramm immer dort ein Plateau, wo ein Stoff einen Übergang von einer Phase auf eine andere vollzieht. Die Wärmeenergie, die genutzt wird, um Arbeit gegen die Bindung der Teilchen zu verrichten, wird *latente Wärme* genannt. In der Literatur werden für verschiedene Phasenübergänge oft andere Bezeichnungen für latente Wärme benutzt. Beim Übergang von fest zu flüssig wird häufig der Begriff *Schmelzwärme*, beim Übergang von flüssig zu gasförmig der Begriff *Verdampfungswärme* benutzt. Diese Unterscheidung nimmt man deshalb vor, da die Energie, die für den Phasenübergang von fest zu flüssig notwendig ist, meist geringer ist als die Energie, die benötigt wird, um den Übergang von flüssig zu gasförmig zu ermöglichen. Dies kann man im Diagramm in den Bereichen 20-100 kcal und 200-740 kcal erkennen.

3.9.3 Das Phasendiagramm

Ein *Phasendiagramm* ist ein Diagramm, das die jeweiligen Phasen eines Stoffes in Abhängigkeit von Zustandsgrößen (meistens Druck und Temperatur) grafisch darstellt. Ein p-T Diagramm ermöglicht zum Beispiel das Ablesen, unter welchem Druck und welcher Temperatur ein Stoff fest, flüssig oder gasförmig ist. Darüber hinaus kann man auch erkennen, unter welchen Druck- und Temperaturbedingungen ein Stoff schmilzt, verdampft oder sublimiert. Bei Phasendiagrammen unterscheidet man zwei grundlegende Aufbauten: Diagramme für Stoffe ohne Anomalie und Diagramme für Stoffe mit Anomalie (genauer: *Dichteanomalie*). In Abbildung 39 ist der Aufbau eines Phasendiagramms für einen Stoff ohne Anomalie einem Phasendiagramm eines Stoffes mit Anomalie gegenübergestellt.

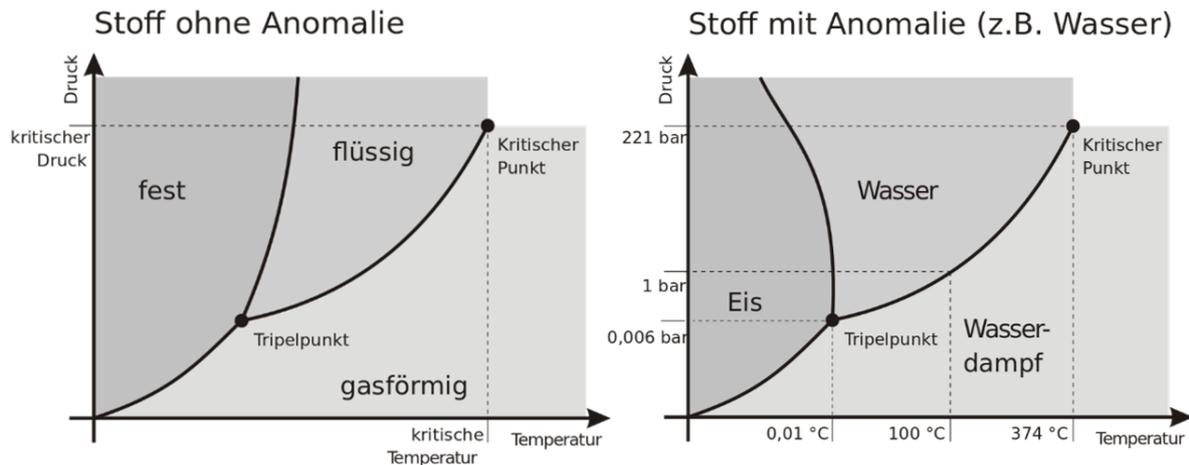


Abbildung 39: Phasendiagramm von normalen und anormale Stoffen (hier: Wasser); <https://de.wikipedia.org/wiki/Phasendiagramm>

Durch die sogenannte *Schmelzdruckkurve* (zwischen fest und flüssig), *Siedepunktskurve* (zwischen flüssig und gasförmig) und *Sublimationsdruckkurve* (zwischen fest und gasförmig) werden die drei Phasen eines Stoffes getrennt. Entlang dieser Kurven sind jeweils zwei der drei Aggregatzustände im thermodynamischen Gleichgewicht. Am sogenannten *Tripelpunkt* herrscht sogar ein Gleichgewicht aller drei klassischen Aggregatzustände. Der *kritische Punkt* kennzeichnet das Angleichen von Flüssigkeit und Gas. Durch die hohen Druck- und Temperaturbedingungen, die jenseits des kritischen Punktes vorherrschen, wird die Dichte des Gases so groß, dass es physikalisch gesehen die Eigenschaften einer Flüssigkeit annimmt. Stoffe im Bereich über dem kritischen Punkt werden als *überkritische Stoffe* bezeichnet.

Stoffe ohne Anomalie haben die Eigenschaft, sich bei Temperaturerhöhung auszudehnen. Das bedeutet, dass ihre Dichte geringer wird, je wärmer sie sind. Dies geschieht sowohl innerhalb einer Phase als auch über eine Phasenänderung hinweg. Stoffe mit Dichteanomalie (in Abbildung 39 als Beispiel Wasser) haben jedoch die Eigenschaft, sich unterhalb einer bestimmten Temperatur bei einer Temperaturabnahme auszudehnen. Das bedeutet, dass diese Stoffe sich in einem gewissen Temperaturbereich bei Abkühlung ausdehnen. Wasser ist hierfür ein gutes Alltagsbeispiel. Wasser hat seine größte Dichte bei 4 °C, also unter Normalbedingungen im flüssigen Zustand. Kühlt man das Wasser nun auf -5 °C ab, und bringt es somit zum Gefrieren, so hat das entstandene Eis ein größeres Volumen (und folge dessen auch eine geringere Dichte) als das Wasser bei 4 °C. Dies ist der Grund warum Eis im Wasser immer oben schwimmt.

3.9.4 Verdunsten

Das Verdunsten einer Flüssigkeit stellt einen Spezialfall des Phasenübergangs von flüssiger Phase zur gasförmigen Phase dar. Beim Verdunsten geht ein Teil der Flüssigkeit in die Gasphase über, ohne den Siedepunkt erreicht zu haben. Das Phänomen der Verdunstung kann mit Hilfe der Maxwell-Boltzmann Verteilung erklärt werden. Die Teilchen der Flüssigkeit besitzen kinetische Energien, die näherungsweise der Maxwell-Boltzmann Verteilung entsprechen. Es gibt also Teilchen in der Flüssigkeit die, verglichen mit den restlichen Teilchen, eine höhere kinetische Energie besitzen. Diese schnellen Teilchen können die Anziehungskräfte der anderen Teilchen in der Flüssigkeit überwinden und so aus dieser entkommen und in die Gasphase übergehen. Nachdem nun ein Teilchen mit hoher kinetischer Energie die Flüssigkeit verlassen hat, sinkt die mittlere kinetische Energie der verbliebenen Flüssigkeitsteilchen und damit die Temperatur der Flüssigkeit. Im Alltag kommt dieser Effekt beim Wäschetrocknen oder auch beim Schwitzen zum Einsatz.

3.9.5 Verdampfungsenergie und die Clausius-Clapeyron Gleichung

Gehen Moleküle von der flüssigen in die gasförmige Phase über, so müssen diese Arbeit gegen die Anziehungskräfte der Flüssigkeit leisten. Um diese nun fehlende Energie in der Flüssigkeit zu ersetzen, muss man dieser Wärme zuführen. Tut man das nicht, so kühlt die Flüssigkeit ab. Um die Temperatur der Flüssigkeit konstant zu halten, muss ihr die *spezifische Verdampfungsenergie* λ zugeführt werden, um 1 kg der Flüssigkeit zu verdampfen. Um hingegen 1 mol der Flüssigkeit isotherm zu verdampfen, wird die *molare Verdampfungsenergie* Λ benötigt. Kondensiert der Dampf wieder, so wird dieselbe Energie wieder frei. Der Zusammenhang zwischen spezifischer und molarer Verdampfungsenergie lautet wie folgt: (Gerthsen, 2006, S. 264)

$$\Lambda = \frac{\lambda \cdot M}{1000} \quad (\text{F.23})$$

Λ ... molare Verdampfungswärme [Λ] = J·mol⁻¹ λ ... spezifische Verdampfungswärme
[λ] = J·kg⁻¹ M... relative Molekülmasse [M] = kg·mol⁻¹

Je größer die molare Verdampfungsenergie eines Stoffes ist, desto steiler ist die Dampfdruckkurve des Stoffes. Der Verlauf der Dampfdruckkurve lässt sich mit Hilfe der *Clausius-Clapeyron Gleichung* berechnen: (Gerthsen, 2006, S. 264)

$$\lambda = T \cdot \frac{dp}{dT} \cdot (v_D - v_{Fl}) \quad (\text{F.24})$$

λ ... spezifische Verdampfungswärme [λ] = J·kg⁻¹ T... Temperatur [T] = K

dp... Druckänderung [dp] = kg·m⁻¹·s⁻² dT... Temperaturänderung [dT] = K

v_D ... spezifisches Dampfvolumen [v_D] = m³·kg⁻¹ v_{Fl} ... spezifisches Flüssigkeitsvolumen

[v_{Fl}] = m³·kg⁻¹

Wenn man annimmt, dass die Abhängigkeit der spezifischen Verdampfungsenergie von der Temperatur vernachlässigbar ist und berücksichtigt, dass im Allgemeinen v_{Fl} sehr viel kleiner ist als v_D , folgt unter Miteinbeziehung der idealen Gasgleichung: (Gerthsen, 2006, S. 265)

$$\frac{dp}{p} = \frac{\Lambda}{R} \cdot \frac{dT}{T^2} \quad (\text{F.25})$$

dp... Druckänderung [dp] = kg·m⁻¹·s⁻² p... Druck [p] = kg·m⁻¹·s⁻² Λ ... molare

Verdampfungswärme [Λ] = J·mol⁻¹ R... Gaskonstante [R] = kg·m²·s⁻²·mol⁻¹·K⁻¹

dT... Temperaturänderung [dT] = K T... Temperatur [T] = K

Integriert man Formel 25, so erhält man schlussendlich das wesentliche Glied der Dampfdruckkurve: (Gerthsen, 2006, S. 265)

$$p \sim e^{-\Lambda/(R \cdot T)} \quad (\text{F.26})$$

p... Druck [p] = kg·m⁻¹·s⁻² Λ ... molare Verdampfungswärme [Λ] = J·mol⁻¹

R... Gaskonstante [R] = kg·m²·s⁻²·mol⁻¹·K⁻¹ T... Temperatur [T] = K

3.9.6 Dampfdruck und Sieden

Um das Konzept des Dampfdrucks zu erläutern, stelle man sich einen geschlossenen Behälter vor, der zum Teil mit Wasser gefüllt ist und vakuumiert wurde. Jene Teilchen des Wassers, die eine kinetische Energie besitzen, die groß genug ist, um die Flüssigkeit zu verlassen, verdunsten in den luftleeren Raum oberhalb der Flüssigkeit. Die Teilchen des so entstandenen Wasserdampfs können durch Abkühlung an der Wasseroberfläche jedoch auch zurück in die Flüssigkeit kondensieren. Die Anzahl der Teilchen im Wasserdampf oberhalb des Wassers

nimmt einige Zeit lang zu, bis ein kritischer Punkt erreicht ist, an dem ebenso viele Teilchen aus der Flüssigkeit verdunsten, wie Teilchen aus dem Wasserdampf zurück in die Flüssigkeit kondensieren. Zu diesem Zustand herrscht nun ein Gleichgewicht zwischen flüssiger und gasförmiger Phase vor und der spezifische Druck, der nun über der Flüssigkeit vorliegt, wird als *Sättigungsdampfdruck* oder *Dampfdruck* bezeichnet. Der Sättigungsdampfdruck jedes Stoffes hängt von der Temperatur ab. Liegt eine hohe Temperatur vor, so besitzen mehr Teilchen der Flüssigkeit die nötige kinetische Energie, um aus dieser zu verdunsten, als bei niedrigeren Temperaturen. Aufgrund dessen wird der Gleichgewichtszustand erst bei einem höheren Druck erreicht. Es kann natürlich auch passieren, dass eine Flüssigkeit komplett verdunstet bevor der Gleichgewichtszustand erreicht wird. Dies geschieht im Alltag zum Beispiel bei einem Glas Wasser, das in einen Raum gestellt wird. Über dem Wasser im Glas liegt nun ein sehr großes Luftvolumen vor, welches im Normalfall (außer bei sehr hoher Luftfeuchtigkeit) nicht mit Wasserdampf gesättigt ist. Um die Sättigung zu erreichen, verdunsten Teilchen des Wassers. Da das Luftvolumen zu groß ist, um durch den Wasserdampf, der durch das Verdunsten des Wassers im Glas entsteht, gesättigt zu werden, verdunstet nach einiger Zeit schlussendlich das gesamte Wasser im Glas. (Giancoli, 2009, S. 637)

Im vorigen Abschnitt wurde bereits erwähnt, dass der Sättigungsdampfdruck einer Flüssigkeit mit der Temperatur zunimmt. Wird die Temperatur einer Flüssigkeit bis zu dem Punkt erhöht, an dem der Sättigungsdampfdruck gleich dem Umgebungsdruck ist, tritt *Sieden* ein. Wird der Siedepunkt erreicht, so bilden sich aufgrund des Phasenübergangs von flüssig zu gasförmig Bläschen in der Flüssigkeit. Ist der Druck in den Bläschen geringer als der Umgebungsdruck, zerplatzen diese. Wird die Temperatur der Flüssigkeit nun weiter erhöht, so steigt der Druck in den Bläschen an und überschreitet bei ausreichend hoher Temperatur den Umgebungsdruck. Nun platzen die Bläschen nicht mehr, sondern nehmen an Größe zu und steigen bis zur Oberfläche auf. Nun hat das Sieden der Flüssigkeit begonnen. Der Siedepunkt von Flüssigkeiten ist vom Umgebungsdruck abhängig. Dies ist der Grund weshalb Wasser am Mount Everest schon bei etwa 70 °C siedet, da dort der umgebende Luftdruck geringer ist als auf Meereshöhe. (Giancoli, 2009, S. 637-638)

Experiment 26: Anomalie des Wassers

Materialien:

- Wasser
- Eis
- Gefäß
- Thermometer

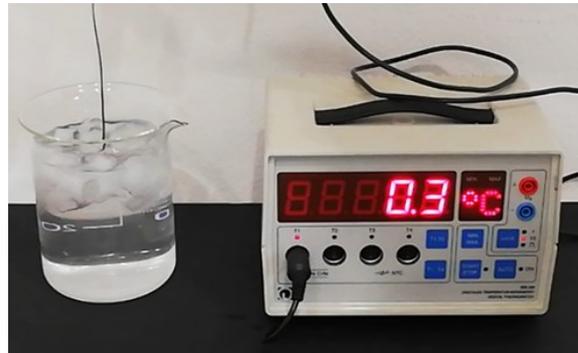


Abbildung 40: Temperaturmessung eines Eisbades; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Link und QR – Code zum Video:



https://youtu.be/a_ti-4feR78

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Um dieses Experiment durchführen zu können wird zunächst ein Gefäß etwa zu gleichen Teilen mit Wasser und Eiswürfeln befüllt. Nun wartet man etwa eine Minute bis das Eis das Wasser gekühlt hat. Währenddessen sollte die Mischung mehrmals umgerührt werden. Man misst nun mit Hilfe eines Thermometers die Temperatur des Wassers nahe an der Oberfläche und nahe des Bodens. Man kann beobachten, dass das Wasser am Boden wärmer ist als jenes in der Nähe der Oberfläche.

Physikalischer Hintergrund

Die Dichte der meisten Stoffe wird höher, je niedriger die Temperatur des Stoffes ist. Wasser ist jedoch ein Stoff mit einer sogenannten Dichteanomalie. Das bedeutet, dass Wasser sich in einem gewissen Temperaturbereich bei Temperaturniedrigung ausdehnt. So besitzt Wasser bei 4 °C, also im flüssigen Zustand, seine höchste Dichte, während Wasser und Eis mit niedrigerer Temperatur eine geringere Dichte besitzen. In diesem Experiment steigt das Wasser, das eine Temperatur von 0,3 °C besitzt, aufgrund einer geringeren Dichte auf, das Wasser mit einer Temperatur von 2,7 °C sinkt jedoch aufgrund seiner höheren Dichte auf den Boden ab.

Experiment 27: Unterschichten von Wasser

Materialien:

- Kaltes und warmes Wasser
- Becherglas
- Trichter
- Tinte

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/Ee6tBjQzb9Q>

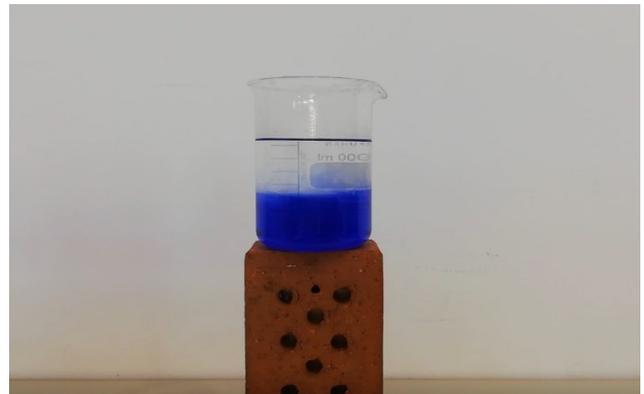


Abbildung 41: Unterschichtung einer kalten, blau-gefärbten Wasserschicht unter eine warme, durchsichtige Wasserschicht; eigenes Bild

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für dieses Experiment wird ein Becherglas zu etwa einem Drittel mit warmen Wasser gefüllt. Anschließend wird kaltes, mit Tinte gefärbtes Wasser mit Hilfe eines Trichters unter das warme Wasser im Becherglas geschüttet. Dabei sollte man vorsichtig vorgehen und das kalte Wasser nur langsam in den Trichter gießen, um etwaige Turbulenzen zu minimieren. Man kann nun sehr gut beobachten, dass sich das kalte gefärbte Wasser wie eine Schicht unter dem warmen Wasser sammelt.

Physikalischer Hintergrund

Das kalte gefärbte Wasser ist dichter als das warme Wasser und sinkt infolgedessen auf den Boden des Becherglases ab, wo es sich sammelt und so eine abgegrenzte Schicht zum warmen, durchsichtigen Wasser bildet.

Experiment 28: Anomalie des Wassers: Ausdehnung beim Gefrieren

Materialien:

- Verschlossene Getränkedose
- Flüssiger Stickstoff
- Styroporbehälter
- Zange

Link und QR – Code zum Video:



https://youtu.be/eY1TmT_bE7s



Abbildung 42: Aufplatzen einer Getränkedose durch Ausdehnung der Flüssigkeit beim Gefrieren; eigenes Bild

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für diesen Versuch benötigt man eine noch verschlossene Getränkedose (hier: Energydrink) und einen mit flüssigem Stickstoff gefüllten Styroporbehälter. Mit Hilfe einer Zange wird die Getränkedose in das flüssige Stickstoffbad getaucht und dort einige Zeit belassen. Nach kurzem warten kann man das Aufplatzen der Dose beobachten.

Physikalischer Hintergrund

Durch die niedrige Temperatur des flüssigen Stickstoffs friert die Flüssigkeit in der Dose nach und nach ein. Da die Flüssigkeit zum größten Teil aus Wasser besteht und sich Wasser beim Gefrieren ausdehnt, steht der frierenden Flüssigkeit in der Dose nicht genug Volumen zur Verfügung, wodurch die Dose durch diese Ausdehnung zum Platzen gezwungen wird.

Experiment 29: Resublimation und flüssiger Sauerstoff

Materialien:

- Schwarz-lackierte Dose
- Flüssiger Stickstoff

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/dWQsVqrKYpg>



Abbildung 43: Resublimation von Wasserdampf an einer mit flüssigem Stickstoff gefüllten Aluminiumdose; eigenes Bild

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Man befüllt die Dose beinahe vollständig mit flüssigem Stickstoff und stellt diese auf einen Tisch. Optional kann man den Tisch auch mit einem schwarzen Tuch bedecken, um die entstehenden Effekte besser sichtbar zu machen. Sofort steigen Nebelschwaden aus der Dose auf. Man sieht nach einiger Zeit, dass sich an der Dose Eis bildet. Hebt man die Dose auf so kann man zusätzlich erkennen, dass eine Flüssigkeit vom Boden der Dose tropft.

Physikalischer Hintergrund

Durch den flüssigen Stickstoff innerhalb der Dose wird diese extrem abgekühlt. Die Temperatur an der Dose ist folge dessen so gering, dass der Wasserdampf in der Luft an der Dose resublimiert, also direkt vom gasförmigen zum festen Zustand übergeht. Hebt man die Dose auf so sieht man darüber hinaus eine Flüssigkeit von der Dose tropfen. Bei dieser Flüssigkeit handelt es sich um flüssigen Sauerstoff, der am Boden der Dose aufgrund der extremen Kälte aus der Luft kondensiert ist. Der Nachweis, dass es sich hierbei tatsächlich um Sauerstoff handelt, erfolgt durch das Tropfen der Flüssigkeit in die Nähe einer Kerzenflamme. Sauerstoff selbst ist zwar nicht brennbar, jedoch brandfördernd. Tropft man diesen in die Nähe einer Kerzenflamme, so erkennt man das Aufflackern der Flamme.

Experiment 30: Gefrieren durch Verdampfen

Materialien:

- Kryophor
- Flüssiger Stickstoff
- Gefäß

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/1cqNJHfuiKU>

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Kryophor besteht aus einer Glaskugel und einem Glaszylinder, die durch eine Glasröhre verbunden und luftleer gemacht wurden. Im Kryophor befinden sich ausschließlich Wasser und Wasserdampf. Für den Versuch verteilt man das Wasser im Kryophor so, dass sich sowohl im Zylinder als auch in der Kugel etwas Wasser befindet. Anschließend wird das Ende mit dem Zylinder in flüssigen Stickstoff getaucht und man beobachtet das Verhalten des Wassers im Kryophor. Das Wasser im Zylinder beginnt zu frieren. Lässt man den Prozess noch einige Zeit weiter laufen, so friert auch das Wasser in der Glaskugel.

Physikalischer Hintergrund

Im Kryophor liegt bei Zimmertemperatur ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen flüssigem und gasförmigem Wasser vor (Sättigungsdampfdruck). Dieses Gleichgewicht verhindert weiteres Verdunsten des flüssigen Wassers. Wird nun das Wasser im Zylinder des Kryophors stark abgekühlt, so kondensiert zuerst der Wasserdampf zurück in das flüssige Wasser und dieses verfestigt sich schlussendlich. Aufgrund des Kondensieren des Wasserdampfs sinkt der Dampfdruck über dem Wasser im Zylinder und folge dessen auch im

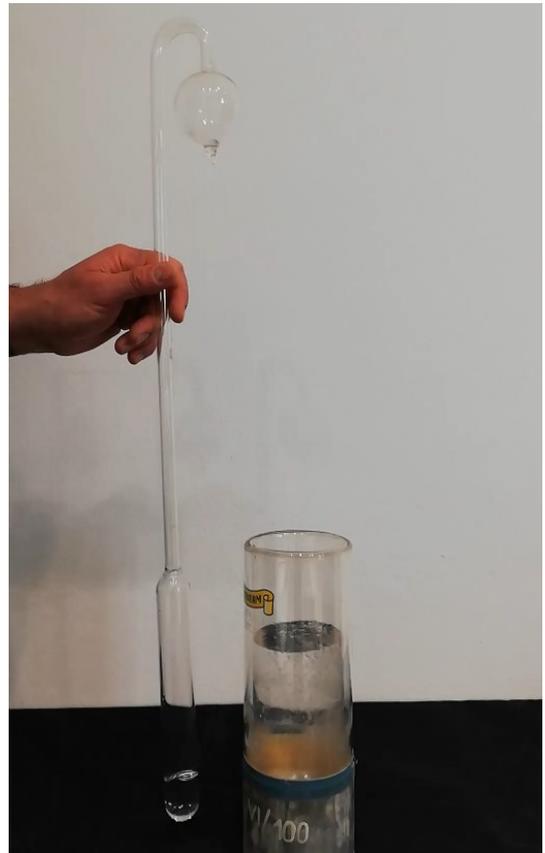


Abbildung 44: Kryophor neben einem mit flüssigem Stickstoff gefüllten Glasbehälter; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Bereich oberhalb des Wassers in der Glaskugel. Um diese Dampfdruckabnahme auszugleichen, verdunstet das Wasser der Glaskugel. Durch den Prozess des Verdunstens wird dem Wasser in der Glaskugel Wärme entzogen, wodurch es sich schlussendlich soweit abkühlt, dass es gefriert.

Experiment 31: Sublimation von CO_2

Materialien:

- Schwarzes Tuch
- CO_2 - Feuerlöscher

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/wHeaFkciX8s>



Abbildung 45: Erzeugung von festem Kohlenstoffdioxid durch adiabatische Expansion; eigenes Bild; Apparatur: TU - Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Um die Sublimation von Kohlenstoffdioxid beobachten zu können, benötigt man Kohlenstoffdioxid in einer Gasflasche, welches durch die adiabatische Expansion, die bei der Öffnung des Ventils vonstattengeht, so stark abgekühlt wird, dass es eine Temperatur von ca. $T = -70\text{ °C}$ erreicht, resublimiert und dadurch fest wird. Für den Versuch bläst man das Kohlenstoffdioxid auf ein schwarzes Tuch, um das Phänomen besser beobachten zu können. Hat sich das feste Kohlenstoffdioxid auf dem Tuch gesammelt, kann man beobachten, dass dieses nach einiger Zeit verschwindet.

Physikalischer Hintergrund

Die Ursache für das Verschwinden des festen Kohlenstoffdioxids ist die Sublimation. Bei den Temperatur- und Druckbedingungen, die im Laborraum vorherrschen, kann Kohlenstoffdioxid nicht in flüssiger Form auftreten. Durch die Wärmezufuhr der Umgebungsluft geht das feste Kohlenstoffdioxid sofort in die Gasphase über, ohne sich zwischenzeitlich zu verflüssigen.

Experiment 32: Festes Argon

Materialien:

- Kupferspiralrohr
- Flüssiger Stickstoff
- Argon
- Vakuumpumpe
- Gefäß



Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/gC0hBB59X7U>

*Abbildung 46: Festes Argon in einer Vakuimglocke; eigenes Bild;
Apparatur: TU – Graz;
Idee: Pottlacher, Gernot, Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.*

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Um festes Argon herzustellen, muss zuerst gasförmiges Argon verflüssigt werden. Dazu leitet man Argon durch ein Kupferspiralrohr, welches in ein Bad von flüssigem Stickstoff getaucht wurde. Im Kupferspiralrohr wird das gasförmige Argon durch die starke Abkühlung verflüssigt, wodurch es als Flüssigkeit am offenen Ende des Rohres herausrinnt, wo man es schlussendlich mit einem Behälter auffängt (ähnlich dem Prozess zur Verflüssigung von Sauerstoff aus Experiment 29). Das nun flüssige Argon wird in eine Vakuumpumpe gestellt und es wird ein starker Unterdruck erzeugt. Man kann beobachten, dass sich das flüssige Argon verfestigt.

Physikalischer Hintergrund

Durch die starke Abkühlung des Argons und den starken Unterdruck in der Vakuumpumpe, wird genau jenes Temperatur-Druck Verhältnis erzeugt, bei welchem sich Argon an seinem Tripelpunkt befindet. Dieser liegt bei einer Temperatur von 83,8 K und einem Druck von 0,6870 bar. Am Tripelpunkt herrscht ein Gleichgewicht von fester, flüssiger und gasförmiger Phase, wodurch Argon hier auch in festem Zustand vorkommen kann.

Experiment 33: Verdampfungswärme – Spiritus und Watte

Materialien:

- Wattebausch
- Spiritus
- Thermometer

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/gddLZNmua2E>



Abbildung 47: Temperaturmessung eines mit Spiritus beträufelten Wattepads; eigenes Bild; Apparatur: TU – Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Um diesen Versuch durchzuführen wird zuerst die Temperatur des Wattebauschs, des Spiritus und der Umgebungsluft gemessen. In dieser Durchführung lag die Temperatur aller drei Komponenten bei etwa 18,3 °C. Diese Temperaturgleichheit der drei Komponenten ist eine Voraussetzung für diesen Versuch. Hat man die vorliegenden Temperaturen bestimmt, wird das Thermometer in den Wattebausch geschoben und dieser anschließend mit dem Spiritus beträufelt. Nun wartet man einige Zeit ab und behält die Anzeige des Thermometers im Auge. Man kann beobachten, dass sich die Temperatur des feuchten Wattebauschs stark verringert.

Physikalischer Hintergrund

Spiritus ist ein flüchtiger Stoff. Das bedeutet, dass flüssiger Spiritus selbst bei Zimmertemperatur sehr schnell durch Verdunsten in die Gasphase übergehen kann. Wird der Wattebausch, in dem das Thermometer steckt, mit Spiritus beträufelt, so beginnt dieser sofort zu verdunsten. Durch das Verdunsten verliert der flüssige Spiritus jedoch an Wärmeenergie, da jene Teilchen, die die höchste kinetische Energie besitzen, die Flüssigkeit verlassen. Dadurch kühlt der flüssige Spiritus in dem Wattebausch ab und das Thermometer zeigt das Absinken der Temperatur an.

Experiment 34: Verdampfungswärme - Schwitzen

Materialien:

- Wärmebildkamera (FLIR)
- Wasser

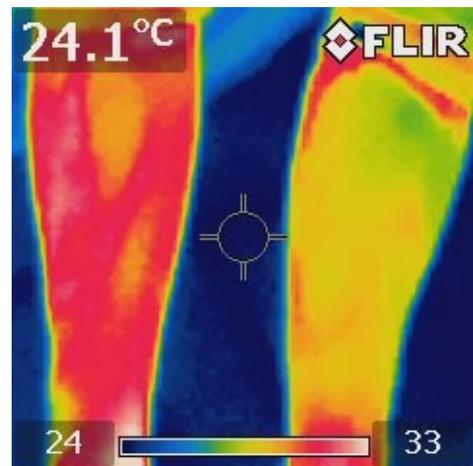


Abbildung 48: Trockene Haut im Vergleich zu feuchter Haut nach Verdunstung der Flüssigkeit; eigenes Bild; Apparatur: TU – Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Um den Effekt des Schwitzens auf den Wärmehaushalt des Körpers zu zeigen, wird der Unterarm einer Person mit Wasser bestrichen, welches zuvor auf Körpertemperatur gebracht wurde, während der andere Unterarm trocken bleibt. Anschließend werden beide Unterarme aneinandergelassen und unter einer Wärmebildkamera betrachtet. Man kann beobachten, dass die Temperatur der feuchten Haut nach ein paar Sekunden geringer ist als jene der trockenen Haut.

Physikalischer Hintergrund

Durch das Verdunsten des Wassers am feuchten Unterarm wird der Haut Verdampfungswärme entzogen. Aufgrund des Wärmeverlustes kühlt die feuchte Haut im Vergleich zur trockenen Haut ab, was in Abbildung 48 sehr gut erkennbar ist.

Experiment 35: Schmelzwärme - Wärmepad

Materialien:

- Wärmepad
- Wärmebildkamera

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/M1TYxn1Z1JM>



Abbildung 49: Geknicktes Wärmepad unter einer Wärmebildkamera; eigenes Bild; Apparatur: TU – Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für diesen Versuch wird vorzugsweise ein durchsichtiges Wärmepad und eine Wärmebildkamera benötigt. Für die Durchführung richtet man die Wärmebildkamera auf das Wärmepad und knickt das Plättchen im Wärmepad. Man kann nun das Erstarren der Flüssigkeit im Wärmepad sowohl mit freiem Auge als auch durch die Wärmebildkamera beobachten. Darüber hinaus kann man in der Wärmebildkamera auch einen deutlichen Temperaturanstieg des Wärmepads erkennen.

Physikalischer Hintergrund

Im Inneren eines Wärmepads liegt eine metastabile Flüssigkeit vor. Das bedeutet, dass die Flüssigkeit auch unterhalb des Schmelzpunktes noch flüssig ist, obwohl sie eigentlich fest sein sollte. Dies wird meist über die Beisetzung von Salzen in der Flüssigkeit realisiert. Durch das Knicken des Plättchens gelangen nun jedoch Fremdkörper als Erstarrungskeime in die Flüssigkeit des Wärmepads, welche diesen metastabilen Zustand auflösen und die Flüssigkeit zum Erstarren bringen. Bei diesem Vorgang wird latente Wärme (Schmelzwärme) freigesetzt, welche zum Temperaturanstieg des Wärmepads führt.

Experiment 36: Dampfdruck

Materialien:

- Glaskolben mit Pfropfen
- Wasserkocher
- Wasser
- Wanne

Link und QR – Code zum Video:



https://youtu.be/b30WNoDd_Y8



Abbildung 50: Siedendes Wasser in einem Glaskolben; eigenes Bild; Apparatur: TU – Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für diesen Versuch wird ein Glaskolben mit kochend heißem Wasser zu etwa dreiviertel vollgefüllt und mit einem Pfropfen verschlossen. Anschließend wird der Glaskolben umgedreht, sodass das Wasserdampf-Luftgemisch im Kolben nach oben steigt und die runde Seite des Kolbens oben liegt. Nun wird der Glaskolben mit kaltem Wasser übergossen und das Wasser im Inneren des Kolbens beobachtet. Man kann erkennen, dass das Wasser im Inneren zu Sieden beginnt.

Physikalischer Hintergrund

Durch das Übergießen des Glaskolbens mit kaltem Wasser, kühlt der Wasserdampf im Inneren des Kolbens ab und kondensiert zurück in das Wasser. Da Wasser weniger Volumen benötigt als Wasserdampf, sinkt der Druck im Gefäß. Das Wasser im Kolben kühlt durch das Übergießen des Kolbens mit dem kalten Wasser nur wenig ab, wodurch der Sättigungsdampfdruck des Wassers annähernd gleich bleibt. Nun herrscht ein Zustand vor, bei dem der Sättigungsdampfdruck des Wassers höher ist, als der Umgebungsdruck im Kolben, wodurch das Wasser zu sieden beginnt.

3.10 LEIDENFROST-EFFEKT

Trifft eine Flüssigkeit auf eine Grenzschicht, die eine Temperatur über dem Siedepunkt der Flüssigkeit besitzt, so kann es bei ausreichend hoher Temperatur zum sogenannten *Leidenfrost-Effekt* kommen. Dieser beschreibt das Phänomen, dass beim Auftreffen der Flüssigkeit auf die Grenzschicht (z.B. Wassertropfen auf den Boden einer heißen Pfanne) die unterste Schicht der Flüssigkeit verdampft und sich so ein Dampfpolster bildet, auf dem die restliche Flüssigkeit sitzt und der diese von der direkten Wärmeübertragung von der Grenzschicht schützt (siehe Abbildung 51). Durch die schlechte Wärmeleitung der Dampfschicht verzögert sich so das Sieden der restlichen Flüssigkeit. Ein gern demonstriertes Experiment, welches diesen Effekt zeigt, ist das Tropfen von Wasser auf eine heiße Herdplatte (siehe Experiment 38).



Abbildung 51: Darstellung des Leidenfrost-Effekts;
Vorlage: https://en.wikipedia.org/wiki/Leidenfrost_effect

Experiment 37: Leidenfrost-Effekt: Stahlkugel

Materialien:

- Stahlkugel auf Stahlstab
- Becherglas
- Heißes Wasser
- Laborgasbrenner

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/xkE1EMPP2pE>



Abbildung 52: Bildung einer Wasserdampfschicht um eine erhitzte Stahlkugel beim Eintauchen in Wasser; eigenes Bild

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für dieses Experiment wird ein Becherglas mit kochend heißem Wasser gefüllt und eine Stahlkugel auf einem Stahlstab mit Hilfe eines Laborgasbrenners etwa fünf bis zehn Minuten lang erhitzt. Anschließend wird die erhitzte Stahlkugel in das heiße Wasser getaucht. Zuerst kann man einen silbrigen Schleier um die Stahlkugel beobachten, der nach einiger Zeit „abreißt“ und das umliegende Wasser zum Kochen bringt.

Physikalischer Hintergrund

Durch das Erhitzen der Stahlkugel ist ihre Temperatur groß genug, um das Wasser in direkter Umgebung der Kugel beim Eintauchen zu Wasserdampf zu verdampfen, welcher dann eine Dampfschicht um die Kugel bildet (Leidenfrost-Effekt). Da Wasserdampf ein schlechter Wärmeleiter ist, schützt diese Schicht das weitere Wasser im Behälter vor der Wärmeübertragung durch die Stahlkugel und dieses siedet dadurch nicht. Nach einiger Zeit kühlt die Stahlkugel jedoch so weit ab, dass die Temperatur für den Leidenfrost-Effekt nicht mehr ausreicht und man beobachtet das Abreißen der Schicht. Da nun die schützende Schicht fehlt, beginnt auch das umliegende Wasser, durch die nun direkte Wärmeübertragung der Stahlkugel auf das Wasser, zu kochen. Der silbrige Schleier, den die Wasserdampfschicht hervorruft, ist ein optisches Phänomen. Wasserdampf hat einen anderen Brechungsindex als Wasser, wodurch die Wasserdampfschicht silbrig erscheint.

Experiment 38: Leidenfrost-Effekt: Heiße Herdplatte

Materialien:

- Heiße Herdplatte
- Wasser

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/viG8JkwegkhY>



Abbildung 53: Wassertropfen auf einer heißen Herdplatte; eigenes Bild

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Dieses Experiment erfordert eine heiße Herdplatte und Wasser. Hat die Herdplatte eine ausreichend hohe Temperatur erreicht, träufelt man Wasser auf diese. Man kann erkennen, dass sich das Wasser zu kleinen Kugeln formt, die über die Herdplatte gleiten. Ist der gewünschte Effekt nicht zu beobachten, liegt die Hauptursache in einer unzureichend hohen Temperatur der Herdplatte.

Physikalischer Hintergrund

Durch die hohe Temperatur der Herdplatte verdampft die unterste Wasserschicht des auftreffenden Wassers und bildet ein Wasserdampfpolster, auf dem das übrige Wasser sitzt (Leidenfrost-Effekt). Durch die schlechte Wärmeleitung des Wasserdampfs schützt diese Schicht das darüberliegende Wasser vor der Wärmeübertragung durch die Herdplatte und die Kugeln gleiten noch solange über die Herdplatte, bis das gesamte Wasser für die Bildung der Dampfschicht verdampft ist.

Experiment 39: „Inverser Leidenfrost-Effekt“

Materialien:

- Paraffin-Öl
- Flüssiger Stickstoff
- Großes Becherglas
- Kleines Becherglas
- Styropor
- Pipette

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/Ev4J7wQfxMc>



Abbildung 54: Öltropfen auf der Oberfläche eines flüssigen Stickstoffbades; eigenes Bild

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für dieses Experiment werden beide Bechergläser ineinander gestellt, wobei der kleinere mit Hilfe von Styroporstücken fixiert wird. Dazu schiebt man die Styroporstücke wie Keile zwischen die beiden Behälter. Das dient dazu, dass der innere Becher bewegungslos bleibt. Danach werden beide Behälter zur gleichen Höhe mit flüssigem Stickstoff gefüllt. Der flüssige Stickstoff im inneren Behälter sollte nun nicht mehr kochen. Anschließend wird mit Hilfe der Pipette ein Tropfen Paraffin-Öl in den inneren Behälter getropft und man kann beobachten, dass der Tropfen auf der Oberfläche des flüssigen Stickstoffs gleitet.

Physikalischer Hintergrund

Aufgrund dessen, dass der Paraffin Tropfen eine sehr viel höhere Temperatur (Zimmertemperatur) als der flüssige Stickstoff besitzt, erhöht sich beim Auftreffen des Öltropfens auf den flüssigen Stickstoff die Temperatur des Stickstoffs unter dem Tropfen. Dies führt dazu, dass der flüssige Stickstoff unter dem Tropfen verdampft und den Tropfen auf einer Stickstoff-Dampfschicht trägt (Leidenfrost-Effekt). Der Tropfen wird solange getragen, bis dieser erstarrt und aufgrund der dadurch erreichten höheren Dichte im Stickstoffbad absinkt.

3.11 THERMOSPANNUNG UND THERMOELEMENTE

Thermoelemente bestehen aus zwei verschiedenen Metalldrähten (z.B. Kupfer und Konstantan), die an einer sogenannten Hauptlötstelle miteinander verschweißt wurden. Die beiden anderen Drahtenden werden mit Leitungsdrähten aus Kupfer verlötet (Nebenlötstellen), die zu einem Spannungsmessgerät führen. Die Temperatur eines Objektes wird gemessen, in dem man die Hauptlötstelle an das Objekt hält. Als Bezugspunkt für die Temperatur, werden die Nebenlötstellen in Eiswasser (ca. 0 °C) getaucht. (Bergmann & Schaefer, 2008, S. 613)

In den heutzutage benutzten Digitalthermometern befindet sich ein solches Thermoelement, welches zur Temperaturmessung herangezogen wird, nur wird hier die Nebenlötstelle auf eine bekannte Temperatur aufgeheizt, anstatt sie auf 0 °C abzukühlen, um damit die Temperaturdifferenz von Hauptlötstelle und Nebenlötstelle zu messen.

3.11.1 Der Seebeck-Effekt

Verbindet man zwei verschiedene elektrische Leiter *A* und *B* zu einem Schaltkreis wie in Abbildung 55 dargestellt, so zeigt das Voltmeter bei gleicher Temperatur $T_1 = T_2$ die Spannung null an. Besteht jedoch eine Temperaturdifferenz an den beiden Kontaktstellen, so misst man eine Thermospannung gemäß dem Zusammenhang:

$$U = (S_A - S_B) \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{F.27})$$

U ... Kontaktspannung [U] = V S_A, S_B ... Seebeck-Koeffizienten [S_A] = [S_B] = $\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$

T_1, T_2 ... Temperaturen an den Kontaktstellen [T_1] = [T_2] = K

Die Seebeck-Koeffizienten sind materialabhängig und besitzen bei Metallen eine typische Größenordnung von 10^{-5} – $10^{-6} \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$. Würde man das Voltmeter in Abbildung 55 durch ein Amperemeter ersetzen, so würde man einen Strom messen, der von der Thermospannung U und dem Gesamtwiderstand R des Schaltkreises abhängt. (Demtröder, *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*, 2017, S. 72-73)

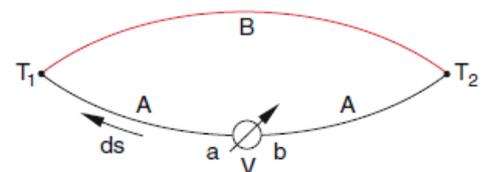


Abbildung 55: Schemenhafte Darstellung eines Thermoelements; (Demtröder, 2017, S.71)

Experiment 40: Thermoelement

Materialien:

- Thermoelement
- Verbindungskabel
- Multimeter

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/f8S35jm-HGs>

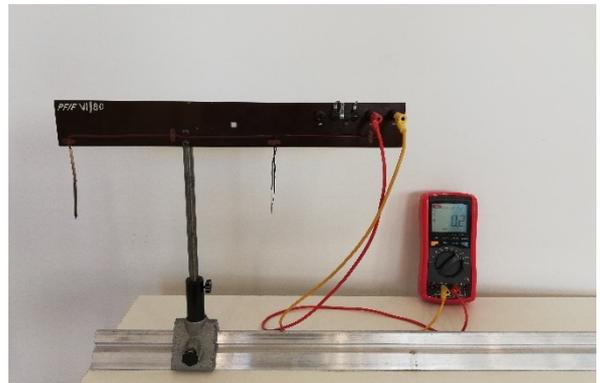


Abbildung 56: Thermoelement mit frei hängender Haupt- und Nebenlötstelle; eigenes Bild; Apparatur: TU – Graz

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für die Durchführung dieses Versuchs wird ein Thermoelement an ein Multimeter angeschlossen. In dem in Abbildung 56 dargestellten Thermoelement befand sich links der Draht der Hauptlötstelle und rechts jener der Nebenlötstelle. Hält man nun die Hauptlötstelle mit zwei Fingern fest, so erkennt man am Multimeter einen von Null verschiedenen Strom bzw. eine von Null verschiedene Spannung.

Physikalischer Hintergrund

Die Nebenlötstelle des Thermoelements hängt frei in der Luft, wodurch die Referenztemperatur des Thermoelements die Umgebungstemperatur ist. Hält man nun den Draht der Hauptlötstelle mit seinen Fingern, die Körpertemperatur haben, fest, so entsteht eine Temperaturdifferenz zwischen Hauptlötstelle und Nebenlötstelle. Diese Temperaturdifferenz ruft nach dem Seebeck-Effekt eine Spannung bzw. einen Stromfluss hervor.

3.12 DIFFUSION

Träufelt man einen Farbstoff in Wasser, so stellt man fest, dass sich der Farbstoff im Wasser verteilt. Am Ende dieses Prozesses ist der Farbstoff gleichmäßig im Wasser verteilt. Dieser Mischvorgang wird *Diffusion* genannt und entsteht durch die Teilchenbewegung der Teilchen in einem Stoff und tritt in Gasen und Flüssigkeiten auf. Die Diffusion ist konzentrationsabhängig, worunter man die Anzahl der Mole einer Substanz in einem bestimmten Volumen versteht. Die diffundierende Substanz (im vorhergegangenen Beispiel der Farbstoff) bewegt sich von Regionen höherer Konzentration zu Orten niedrigerer Konzentration. Aufgrund der Abhängigkeit der Teilchenbewegung der Teilchen eines Stoffes von seiner Temperatur, diffundieren Stoffe in warmen Gasen bzw. Flüssigkeiten schneller, als in kälteren. (*Giancoli, 2009, S. 642*)

Die Diffusion einer Substanz, die in einem Stoff gelöst ist, ist umso größer, je stärker das Konzentrationsgefälle innerhalb des Stoffes ist. Dieser Zusammenhang wird als *Fick'sches Gesetz* bezeichnet: (*Giancoli, 2009, S. 643*)

$$J = -D \cdot A \cdot \frac{dc}{dx} \quad (\text{F.28})$$

J... Diffusionsstrom [J] = mol·s⁻¹ D... Diffusionskoeffizient [D] = m²·s⁻¹

A... Querschnittsfläche [A] = m² dc... Änderung der Teilchenkonzentration [dc] = mol·m⁻³

dx... Änderung der Länge [dx] = m

Der Diffusionskoeffizient *D* hängt des Weiteren indirekt von der Masse der Teilchen ab, wodurch man folgern kann, dass leichte Teilchen schneller diffundieren als schwere.

Experiment 41: Thermische Bewegung - Diffusion von Tinte

Materialien:

- Kaltes Wasser
- Heißes Wasser
- Tinte
- Durchsichtige Gefäße



Abbildung 57: Diffusion von Tinte in mit unterschiedlich warmem Wasser gefüllten Behältern; eigenes Bild

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/FutBm0FX7BQ>

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für diesen Versuch wird ein Gefäß mit heißem und eines mit kaltem Wasser befüllt. Man tropft nun in beide Gefäße ein paar Tropfen Tinte und beobachtet, wie sich die Tinte in den jeweiligen Gefäßen verhält. Man kann erkennen, dass sich die Tinte im heißen Wasser wesentlich schneller verteilt, als jene im kalten Wasser.

Physikalischer Hintergrund

Durch das Eintropfen der Tinte in das Wasser, liegt an der Eintropfstelle eine Überkonzentration an Tinte vor. Durch Diffusion strebt die Tinte eine möglichst gleichmäßige Verteilung im Wasser an, wodurch sich die Tinte im Wasser zu verteilen beginnt. Da die Diffusion der Tinte unter anderem direkt von der Stärke Teilchenbewegung der Teilchen des Wassers abhängt, verteilt sich die Tinte im warmen Wasser schneller, als im kalten.

Experiment 42: Diffusion von Helium

Materialien:

- Helium
- Becherglas
- Hohles Tongefäß
- Abgedichtetes Becherglas
- Pfropfen
- Glasröhrchen



Abbildung 58: Druckerhöhung durch Diffusion von Helium; eigenes Bild; Apparatur: TU – Graz

Link und QR – Code zum Video:



https://youtu.be/i_IPA18SDCQ

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Der Versuchsaufbau für dieses Experiment sieht vor, ein mit etwas Wasser gefülltes Becherglas mit Hilfe eines Pfropfens abzudichten, und durch den Pfropfen zwei Glasröhrchen zu stecken, welche die Zu- und Abfuhr von Gasen und Flüssigkeiten erlauben. Eines dieser Glasrohre war kurz vor seinem Ende geknickt, während das andere gerade verlief. Auf das Ende des geraden Glasröhrchens wird nun das Tongefäß gestülpt und dieses mit Hilfe eines Pfropfens abgedichtet, während das geknickte Ende offen gelassen wird. Über das Tongefäß wird nun schlussendlich ein weiteres Becherglas gestülpt. Nun wird mit einem Schlauch das Helium von unten in das über das Tongefäß gestülpte Becherglas geleitet. Man kann erkennen, dass das Wasser aus dem mit Wasser gefüllten Becherglas aus dem offenen Rohr gedrückt wird und herausspritzt. Stellt man die Heliumzufuhr ab und entfernt das über das Tongefäß gestülpte Becherglas, so kann man erkennen, dass Luft durch das offene Ende des Glasrohrs hineingesaugt wird.

Physikalischer Hintergrund

Durch die Zufuhr von Helium steigt die Konzentration des Heliums außerhalb des Tongefäßes im Vergleich zum Inneren und die Konzentration der Luftteilchen sinkt im äußeren Bereich verglichen zum Inneren. Da die Heliumteilchen leichter sind als die Luftteilchen, diffundieren diese schneller ins Innere des Tongefäßes als die Luftteilchen, die sich im Inneren befinden, nach außen diffundieren können. Dadurch entsteht im Inneren ein Überdruck, der schlussendlich das Wasser aus dem offenen Glasrohr drückt. Entfernt man nun das Becherglas rund um das Tongefäß, so sinkt im Außenbereich des Tongefäßes die Konzentration der Heliumteilchen, während die Luftteilchenkonzentration steigt. Nun liegt im Inneren eine Überkonzentration an Heliumteilchen und außen eine Überkonzentration an Luftteilchen vor. Wieder gilt, dass die leichten Heliumteilchen schneller aus dem Inneren in das Äußere diffundieren können, als die schweren Luftteilchen von außen nach innen diffundieren können, wodurch im Innenbereich ein Unterdruck entsteht. Dieser führt dazu, dass Luft durch das offene Glasrohr nach innen gesaugt wird.

3.13 VISKOSITÄT VON GASEN

Die *Viskosität*, oder auch die *Zähigkeit* eines Gases, wird durch den Impulsübertrag der Gasteilchen verursacht. Man stelle sich zur Veranschaulichung zwei parallel voneinander angeordnete Platten vor, in deren Zwischenraum sich ein Gas befindet. Nun versetzt man die obere Platte mit einer konstanten Geschwindigkeit v_{oben} in Bewegung und lässt die untere Platte ruhen (siehe Abbildung 59). Nun bewegen sich die Gasteilchen

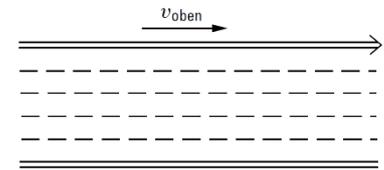


Abbildung 59: Kinetische Deutung der inneren Reibung eines Gases; (Bergmann Schäfer, 2008, S.656)

in der Nähe der oberen Platte annähernd mit der Geschwindigkeit v_{oben} , während die Teilchen nahe der unteren Platte eine Geschwindigkeit von annähernd null besitzen. Die Geschwindigkeit steigt linear zwischen der unteren Platte und der oberen Platte an, wobei das Gas in parallele Schichten gleicher Geschwindigkeit zerfällt. Stößt nun ein Teilchen aus dem Inneren des Gases aufgrund seiner thermischen Bewegung gegen die obere Platte, so findet ein Impulsübertrag statt. Das Teilchen nimmt einen Teil des Impulses der bewegten Platte auf, welchen es durch Zusammenstöße an Teilchen in tieferen Schichten weitergibt. Dadurch verliert die obere Platte Impuls, der durch Zusammenstöße der Gasteilchen bis an die untere Platte übertragen wird. Ohne zusätzliche Krafteinwirkung auf die obere, bewegte Platte wird diese durch den Impulsverlust verzögert, während die untere, ruhende Platte durch die Erhöhung ihres Impulses beschleunigt wird. Diese Impulsübertragung eines Gasteilchens mit größerem Impuls, auf ein Gasteilchen mit niedrigerem Impuls innerhalb eines Gases stellt die Viskosität des Gases dar. (Bergmann & Schaefer, 2008, S. 655-656)

Die Viskosität eines Gases ist gegeben durch: (Higatsberger, 1977, S. 239)

$$\eta = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{16} \cdot m \cdot k_B \cdot T}}{\sigma} \quad (\text{F.29})$$

η ... Viskosität [η] = $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ m ... Masse des Teilchens [m] = kg

k_B ... Boltzmann-Konstante [k_B] = $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ T ... Temperatur [T] = K

σ ... Wirkungsquerschnitt [σ] = m^2

In Formel 29 ist ersichtlich, dass die Viskosität eines Gases mit zunehmender Temperatur ansteigt. Das bedeutet, dass die Impulsübertragungen von Teilchen eines Gases bei einer höheren Temperatur häufiger stattfinden und stärker sind, als bei niedrigeren Temperaturen.

Experiment 43: Innere Reibung eines Gases

Materialien:

- Kupferspiralrohr
- Wasserstoff
- Skala
- Flüssiger Stickstoff
- Heißes Wasser
- Feuerzeug
- Natriumchlorid

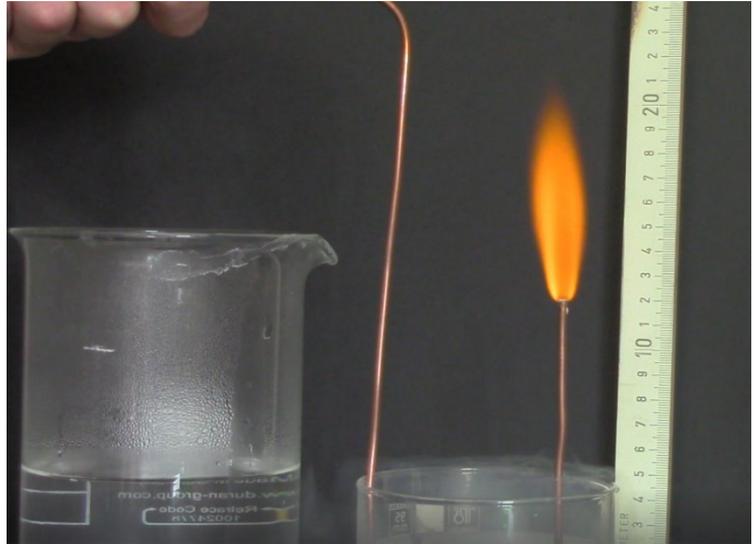


Abbildung 60: Flammenhöhe von entzündetem Wasserstoff in einem flüssigen Stickstoffbad; eigenes Bild; Apparatur: TU – Graz

Link und QR – Code zum Video:



<https://youtu.be/cgagXHOWWfM>

Versuchsdurchführung und Beobachtung

Für dieses Experiment leitet man Wasserstoff mit konstantem Druck durch ein U-förmiges Kupferspiralrohr und entzündet diesen mit Hilfe eines Feuerzeugs am offenen Ende des Rohres. Mit Hilfe von Natriumchlorid wird die Flamme besser sichtbar gemacht. Man stellt nun das Kupferrohr in heißes Wasser und beobachtet die Höhe der Flamme. Anschließend wird das Rohr in flüssigen Stickstoff getaucht und erneut die Flammenhöhe beobachtet. Man erkennt, dass die Flamme nach der Abkühlung deutlich höher ragt, als sie es vor der Abkühlung tat.

Physikalischer Hintergrund

Durch die Abkühlung des Kupferspiralrohres sinkt auch die Temperatur des Wasserstoffs im Rohr. Neben der Temperatur sinkt nach Formel 29 jedoch ebenfalls die Viskosität des Wasserstoffs, wodurch weniger starke Impulsübertragungen im Inneren des Gases und von den Gasteilchen an das Kupferrohr stattfinden, weshalb weniger kinetische Energie der Teilchen durch Reibung verloren geht. Dadurch strömen die Teilchen mit einer höheren Geschwindigkeit aus dem Kupferrohr, wodurch die Flamme höher emporsteigen kann.

4. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Maxwell-Boltzmann Verteilung.....	12
Abbildung 2: Bimetallstreifen unter Wärmezufuhr	17
Abbildung 3: Versuchsaufbau für die Volumsausdehnung einer Eisenkugel unter Wärmezufuhr.....	18
Abbildung 4: Volumsausdehnung einer Flüssigkeit unter Wärmezufuhr	19
Abbildung 5: Aufsteigende Gasblasen aufgrund der Volumsausdehnung eingeschlossener Luft durch Wärmezufuhr.....	20
Abbildung 6: Joules Versuch zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents.....	22
Abbildung 7: Gegenüberstellung: Drahtbügel nach mehrmaligem Biegen unter einer Wärmebildkamera und unter einer normalen Kamera	23
Abbildung 8: Aufbau eines Kalorimeters.....	25
Abbildung 9: Geräte für die Bestimmung von Wärmekapazitäten diverser Probekörper	26
Abbildung 10: Ein mit Wasser gefüllter Luftballon über einer Kerzenflamme.....	28
Abbildung 11: p-T Diagramm für eine isochore Zustandsänderung.....	31
Abbildung 12: p-V Diagramm für eine isotherme Zustandsänderung.....	32
Abbildung 13: V-T Diagramm für eine isobare Zustandsänderung.....	33
Abbildung 14: Zustandsänderungen im p-V Diagramm im Vergleich	34
Abbildung 15: Zufuhr von Wärme auf eine mit einer Münze verschlossene Glasflasche.....	35
Abbildung 16: Implosion einer Plastikflasche durch Abkühlung	36
Abbildung 17: Volumsverkleinerung durch Druckerhöhung in einer Boyle-Mariotte Apparatur.....	37
Abbildung 18: Volumsausdehnung von Luft in einem Glaskolben durch Wärmezufuhr.....	38
Abbildung 19: Aufbau für den Demonstrationsversuch: Pneumatisches Feuerzeug	39
Abbildung 20: Nebel in einer Plastikflasche.....	40
Abbildung 21: Dosenimplosion	41
Abbildung 22: Wärmedurchgang an einer Wand.....	44
Abbildung 23: Konvektion von Luft in einem beheizten Raum	45
Abbildung 24: Diagramm: Wien'sches Verschiebungsgesetz.....	47
Abbildung 25: Unterbrechung einer Flamme durch Wärmeleitung eines Drahtgitters	48
Abbildung 26: Schmelzende Eiswürfel auf unterschiedlichen Oberflächen.....	49

Abbildung 27: Drähte unterschiedlichen Materials mit Wachskugeln unter Wärmezufuhr durch Kerzenflammen	50
Abbildung 28: Eis, Wasser und Wasserdampf zeitgleich in einem Reagenzglas	52
Abbildung 29: Papierspindel oberhalb einer Kerzenflamme	53
Abbildung 30: Konvektion von Tinte in einem mit Wasser gefüllten, rechteckigen Glasrohr	54
Abbildung 31: Anordnung zur Fokussierung der Wärmestrahlung einer Glühlampe auf ein Thermometer	55
Abbildung 32: Messung der Wärmestrahlung einer Seite des Leslie-Würfels	56
Abbildung 33: Temperaturmessung von Wasser in Behältern mit unterschiedlichen Oberflächen nach 15-minütiger Bestrahlung durch eine Wärmelampe	57
Abbildung 34: Aufzeichnung der Wellenlängenverschiebung der Strahlung einer Glühlampe durch Erhöhung der Strahlungsintensität	58
Abbildung 35: Verteilung von Gasteilchen in einer Box	60
Abbildung 36: Veranschaulichung der Entropie durch Vermischen von Salz und Pfeffer	62
Abbildung 37: Phasenübergänge.....	64
Abbildung 38: Phasenübergänge und Temperaturerhöhung von Wasser durch Zufuhr von Wärme	64
Abbildung 39: Phasendiagramm von normalen und anormale Stoffen (hier: Wasser).....	66
Abbildung 40: Temperaturmessung eines Eisbades.....	70
Abbildung 41: Unterschichtung einer kalten, blau-gefärbten Wasserschicht unter eine warme, durchsichtige Wasserschicht	71
Abbildung 42: Aufplatzen einer Getränkedose durch Ausdehnung der Flüssigkeit beim Gefrieren.....	72
Abbildung 43: Resublimation von Wasserdampf an einer mit flüssigem Stickstoff gefüllten Aluminiumdose	73
Abbildung 44: Kryophor neben einem mit flüssigem Stickstoff gefüllten Glasbehälter	74
Abbildung 45: Erzeugung von festem Kohlenstoffdioxid durch adiabatische Expansion.....	76
Abbildung 46: Festes Argon in einer Vakuumlöcke.....	77
Abbildung 47: Temperaturmessung eines mit Spiritus beträufelten Wattepad	78
Abbildung 48: Trockene Haut im Vergleich zu feuchter Haut nach Verdunstung der Flüssigkeit	79
Abbildung 49: Geknicktes Wärmepad unter einer Wärmebildkamera	80
Abbildung 50: Siedendes Wasser in einem Glaskolben.....	81
Abbildung 51: Darstellung des Leidenfrost-Effekts	82

Abbildung 52: Bildung einer Wasserdampfschicht um eine erhitzte Stahlkugel beim Eintauchen in Wasser	83
Abbildung 53: Wassertropfen auf einer heißen Herdplatte.....	84
Abbildung 54: Öltropfen auf der Oberfläche eines flüssigen Stickstoffbades.....	85
Abbildung 55: Schemenhafte Darstellung eines Thermoelements	86
Abbildung 56: Thermoelement mit frei hängender Haupt- und Nebenlötstelle.....	87
Abbildung 57: Diffusion von Tinte in mit unterschiedlich warmem Wasser gefüllten Behältern	89
Abbildung 58: Druckerhöhung durch Diffusion von Helium	90
Abbildung 59: Kinetische Deutung der inneren Reibung eines Gases	92
Abbildung 60: Flammenhöhe von entzündetem Wasserstoff in einem flüssigen Stickstoffbad	93

5. LITERATURVERZEICHNIS

- Apolin, M. (2008). *Big Bang* (Bd. 1). Wien: öbv.
- Bergmann, L., & Schaefer, C. (2008). *Lehrbuch der Experimentalphysik* (Bd. 12). Walter de Gruyter.
- bildung.bmbwf.gv.at/. Abgerufen am 17. März 2019 von
https://bildung.bmbwf.gv.at/schulen/unterricht/lp/ahs16_791.pdf?61ebzq und
https://bildung.bmbwf.gv.at/schulen/unterricht/lp/lp_neu_ahs_10_11862.pdf?61ebyx
- Das Kelvin. (kein Datum). Abgerufen am 17. März 2019 von
<https://www.ptb.de/cms/forschung-entwicklung/forschung-zum-neuen-si/countdown-zum-neuen-si/das-kelvin.html>
- Demtröder, W. (2017). *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik* (Bd. 7). Berlin: Springer-Verlag.
- Gerthsen, C. (2006). *Gerthsen Physik* (Bd. 23). Springer-Verlag.
- Giancoli, D. (2009). *Physik: Lehr- und Übungsbuch* (Bd. 3). Pearson Studium.
- Higatsberger, M. (1977). *Physik in 700 Experimenten*. Frankfurt/Main: Blick in die Welt.
- Jaros, A., Nussbaumer, A., & Nussbaumer, P. (2012). *Physik compact. Basiswissen 6* (Bd. 1). Wien: öbv.
- Kircher, E., Girwidz, R., & Häußler, P. (2009). *Physikdidaktik - Theorie und Praxis* (Bd. 2). Würzburg: Springer-Verlag.
- Muth, L., & Erb, R. (2017). *Einfluss der Auswertephase von Experimenten im Physikunterricht auf den Fachwissenszuwachs und die Experimentierkompetenz von Schülerinnen und Schülern*. Abgerufen am 17. März 2019 von
<http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/765/911>
- Scharf, R., & Middelmann, T. (Juli 2018). Naturkonstanten als Fundament. Paradigmenwechsel im Internationalen Einheitensystem (SI). *Experimente für das neue Internationale Einheitensystem (SI)*, 2, 5-16. Abgerufen am 26. März 2019

Sexl, R. (2012). *Physik 6* (Bd. 1). Wien: öbv.

Tesch, M., & Duit, R. (2004). *Experimentieren im Physikunterricht – Ergebnisse einer Videostudie*. Abgerufen am 17. März 2019 von ftp://ftp.rz.uni-kiel.de/pub/ipn/zfdn/2004/3.Tesch_Duit_051-070.pdf

Tipler, P., & Mosca, G. (2014). *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure* (Bd. 7). Berlin: Springer-Verlag.

Wiesner, H., Schecker, H., & Hopf, M. (2018). *Physikdidaktik kompakt* (Bd. 4). Seelze: Aulis Verlag.

Winkelmann, J., & Erb, R. (2018). *Der Einfluss von Schüler- und Demonstrationsexperimenten auf den Lernzuwachs in Physik*. Abgerufen am 17. März 2019 von <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/812/961>