Robert Schantl

Freihandversuche 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

2007

Ein herzliches Dankeschön…

… bei Ao. Univ.- Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher, der mir beim Schreiben dieser Arbeit sehr viel Freiheit gelassen hat, und mir im Endstadium mit vielen guten Ratschlägen zur Seite stand.

… Marie, Candida, Verena, Marlene, Matthias, Waldemar, Michael und Christoph für die Hilfe beim Aufzeichnen der Versuche.

… meiner Schwester und Barbara für das Korrekturlesen der Arbeit und Verena die mir bei der Strukturierung sehr hilfreich war.

… den Mitarbeiterinnen der Brucker Pfarrcaritas unter Maria Köppel, die es mir ermöglichten auch während meines Zivildienstes mein Studium fortzusetzen.

… der Leitung und dem Physikkustodiat des BG und BRG Bruck an der Mur, in dessen Räumen ich die Versuche durchführen durfte.

… den Mitglieder der MAF und meinen Schulfreunden, für die vielen abwechslungsreichen Diskussionen in den letzten Jahren.

… den Brucker Minis, die ich mein ganzes Studium über betreuen durfte, und zu denen in den letzten Jahren tiefe Freundschaft gewachsen ist. Der regelmäßige Kontakt mit diesen jungen Menschen war mir eine wichtige Abwechslung in meinem Studienalltag.

… an Günter Rauchegger, in dessen Unternehmen ich meine ganzes Studium über unterrichten durfte. Danke für das Vertrauen.

… Verena, Peter, Marie und Ina ohne die mir etwas wichtiges fehlen würde..

… aber vor allem meiner Familie, die mir mein Studium ermöglicht hat. Insbesondere die gemeinsamen Mittagessen mit meinen Eltern, meiner Schwester und meinem Cousin waren in den letzten Jahren immer etwas Besonderes für mich.

Vorwort

Im Studienplan für das Unterrichtsfach Physik an der Karl-Franzens-Universität Graz ist es vorgesehen, dass jeder Student und jede Studentin die Lehrveranstaltungen „Schulversuche I“ und „Schulversuche II“ (früher: Planung und Analyse von Physikunterricht I und II) besucht. „Schulversuche I“ wird dabei an der technischen Universität Graz durchgeführt und von Ao. Univ.- Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Pottlacher betreut. Jedes Semester werden dabei ein oder zwei „Freihandversuchs-Sessions“ durchgeführt, in denen Studentinnen und Studenten jeweils zwei Freihandexperimente vorbereiten und vorstellen. Dankenswerterweise hatte Professor Pottlacher die Idee, die Protokolle dieser Experimente über die Jahre zu sammeln und Lehramtsstudentinnen und Lehramtsstudenten die Möglichkeit zu geben, diese Protokolle zu sortieren und daraus mehrere Diplomarbeiten zu Freihandexperimenten über verschiedene physikalische Themen zu schreiben. Als sich mir die Möglichkeit bot, die Versuche zum Kapitel Thermodynamik zu bearbeiten, habe ich diese gerne wahrgenommen.

Ziel dieser Arbeit ist es über 50 Freihandversuche auszuwählen und deren Aufbau, die Durchführung und die physikalischen Hintergründe zu beschreiben. Ergänzt werden diese Beschreibungen durch Materiallisten und gegebenenfalls durch Fotos die den Versuchsaufbau zeigen. Die Versuche sollten dabei so beschrieben und erklärt sein, dass sie auch von Laien durchgeführt und verstanden werden können. Die Versuche selbst sind zu dreizehn Unterkapiteln zusammengefasst, an deren Kapitelanfängen immer ausführlichere Erklärungen über die physikalischen Hintergründe gemacht werden. Ergänzend dazu sollen einige Versuche auch gefilmt und als DVD gesammelt werden. Schülerinnen und Schüler, Lehrerinnen und Lehrern aber auch Menschen mit Begeisterung für Physik soll damit die Möglichkeit gegeben werden, Versuche ohne aufwendige Laboreinrichtung und ohne allzu viel Zeitaufwand durchzuführen.

Ich habe mich nach bestem Wissen gewissenhaft bemüht, jegliche Quellen die ich beim Erstellen dieser Arbeit verwendet habe, ordnungsgemäß anzugeben. Leider gehen aus den Versuchsprotokollen der Lehrveranstaltung keine Zitate und Quellenangaben hervor, womit nicht auszuschließen ist, dass Teile aus bereits vorhandener Literatur verwendet wurden.

1 Fachdidaktischer Teil 1

1.1 DEFINITIONEN 1

1.1.1 Freihandversuch 1

1.1.2 Arten von Freihandversuchen 3

1.2 FACHDIDAKTISCHE ASPEKTE 4

1.2.1 Gründe für Experimente im Unterricht 4

1.2.2 Wann können Experimente eingesetzt werden 4

1.3 ROLLE VON EXPERIMENTEN IM HINBLICK AUF DEN LEHRPLAN DER AHS 6

1.3.1 Aspekte im Physiklehrplan der AHS Unterstufe 6

1.3.2 Aspekte im Physiklehrplan der AHS Oberstufe 7

1.4 DER FREIHANDVERSUCH HEUTE 9

2 Experimenteller Teil 10

2.1 TEMPERATUR UND MOLEKULARBEWEGUNG 10

2.1.1 Physikalischer Hintergrund 10

2.1.2 Zucker löst sich schneller 12

2.1.3 Tee löst sich im Wasser 13

2.2 LÄNGENAUSDEHNUNG VON FESTKÖRPERN 15

2.2.1 Physikalischer Hintergrund 15

2.2.2 Die dicker werdende Münze 17

2.2.3 Längenausdehnung einer Stricknadel 18

2.2.4 Funktionsweise eines Bimetallstreifens 19

2.2.5 Die länger werdende Gitarrensaite 21

2.3 GASGESETZE 22

2.3.1 Physikalischer Hintergrund 22

2.3.2 Das Münzventil 26

2.3.3 Flaschenimplosion 27

2.3.4 Der neugierige und der schüchterne Luftballon 28

2.3.5 Korkenknallen 31

2.3.6 Luft im Glaskolben 31

2.3.7 Ein Dampfboot 33

2.3.8 Die implodierende Dose 34

2.3.9 Ein Thermometer 35

2.4 GUMMI UNTER WÄRMEEINFLUSS 37

2.4.1 Physikalischer Hintergrund 37

2.4.2 Gummi zieht sich beim Erwärmen zusammen 39

2.5 SPEZIFISCHE WÄRMEKAPAZITÄT 41

2.5.1 Physikalischer Hintergrund 41

2.5.2 Ein nicht brennender Papierbecher 43

2.5.3 Feuerfester Luftballon 44

2.5.4 Eine Kerze brennt unter Wasser ... *45*
2.6 AGGREGATZUSTÄNDE UND PHASENÜBERGÄNGE ... 47
2.6.1 Physikalischer Hintergrund ... *47*
2.6.2 Verdunstungskälte ... *50*
2.6.3 Eine Spritze als Wasserkocher ... *51*
2.6.4 Wann verdampfen Flüssigkeiten ... *53*
2.6.5 Siedepunkt von Fett ... *56*
2.6.6 Wasserdampf kondensiert ... *57*
2.6.7 Sieden durch Kondensation ... *57*
2.6.8 Schmelzwärme ... *59*
2.7 WÄRMELEITUNG ... 61
2.7.1 Physikalischer Hintergrund ... *61*
2.7.2 Wärmeleitung auf Metallplatten ... *62*
2.7.3 Wärmeleitung in Draht mit Wachskügelchen ... *63*
2.7.4 Keine Brandlöcher im Taschentuch ... *65*
2.7.5 Schlechte Wärmeleitung von Wasser ... *66*
2.7.6 Das sonderbare Verhalten von Flammen unter einem Drahtnetz ... *67*
2.8 KONVEKTION ... 69
2.8.1 Physikalischer Hintergrund ... *69*
2.8.2 Funktionsweise eines Doppelfensters ... *69*
2.8.3 Kamin ... *71*
2.8.4 Flaschenvulkan ... *72*
2.8.5 Konvektion sorgt für schnellere Abkühlung bei größerer Oberfläche ... *74*
2.8.6 Ein Laufrad über einer Kerze ... *75*
2.8.7 Der fliegende Teebeutel ... *76*
2.8.8 Konvektion in einem Rohsystem ... *77*
2.9 WÄRMESTRAHLUNG ... 78
2.9.1 Physikalischer Hintergrund ... *78*
2.9.2 Der Wärmehaushalt der Haut ... *81*
2.9.3 Die tanzende Münze ... *82*
2.9.4 Reflexion von Wärmestrahlen ... *83*
2.9.5 Emissions- und Absorptionsvermögen unterschiedlicher Oberflächen ... *85*
2.10 MECHANISCHES WÄRMEÄQUIVALENT ... 86
2.10.1 Physikalischer Hintergrund ... *86*
2.10.2 Der gebogene Kleiderbügel ... *87*
2.10.3 Wärmeentwicklung an einer Bohrmaschine ... *87*
2.11 ENTROPIE ... 89
2.11.1 Physikalischer Hintergrund ... *89*
2.11.2 Es kostet Energie, die Entropie eines Systems zu verringern ... *90*
2.11.3 Der Zustand größter Unordnung ist der Wahrscheinlichste ... *91*
2.12 DAS BESONDERE VERHALTEN VON WASSER ... 94

2.12.1 Physikalischer Hintergrund ... *94*
2.12.2 Ballons unterschiedlicher Dichte ... *95*
2.12.3 Anomalie des Wassers ... *96*
2.12.4 Eis hat größeres Volumen als Wasser ... *97*
2.12.5 Unterkühltes Wasser ... *98*
2.12.6 Der schwebende Eiswürfel ... *99*
2.12.7 Der geteilte Eisblock ... *100*
2.12.8 Die Schmelzwärme von Wasser ... *101*
2.13 WICHTIGE GEHILFEN IN DER THERMODYNAMIK: KERZEN ... 103
2.13.1 Physikalischer Hintergrund ... *103*
2.13.2 Eine Kerzenflamme hebt Wasser ... *104*
2.13.3 Beim Verbrennen einer Kerze entsteht Ruß ... *106*
2.13.4 Beim Verbrennen einer Kerze entsteht Wasser ... *106*
2.13.5 Tafelkreide als Docht ... *107*
2.13.6 Der brennbare Stoff einer Kerze ... *108*

3 Anhang ... 109

3.1 LITERATURVERZEICHNIS ... 109
3.2 ABBILDUNGSVERZEICHNIS ... 110

1 Fachdidaktischer Teil

Wir leben in einer hoch technologisierten Gesellschaft, in der technische Geräte aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken sind. Mobiltelefone und MP3-Player begleiten uns auf Schritt und Tritt, Autos und Flugzeuge erlauben den Menschen höhere Mobilität, Waschmaschinen, Computer und Fernseher sind praktisch in jedem Haushalt zu finden. Gleichzeitig erlaubt die steigende technische Komplexität dieser Geräte es aber immer weniger Menschen, die Funktionsweise und die physikalischen Vorgänge im Hintergrund zu verstehen. Physik und Technik werden schnell als schwierig und im Weiteren auch als langweilig empfunden. Mittels einfacher Experimente, welche physikalische Grundprinzipien erklären, kann diesem Empfinden entgegengetreten werden. Diese einfachen Experimente, die ohne viel Aufwand durchgeführt werden können, werden als Freihandexperimente beziehungsweise als Freihandversuche bezeichnet.

1.1 Definitionen

1.1.1 Freihandversuch

Der Begriff Freihandversuch ist noch relativ jung. Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts war es noch nicht notwendig, Experimente in verschiedene Klassen zu unterteilen. Erst das vermehrte Aufkommen von teureren und immer komplexeren Apparaturen erforderte einen Sammelbegriff für schnelle, einfache und billige Versuche zu finden.
Ein weiterer Grund kann in der Entwicklung der Schule zu dieser Zeit gesehen werden. Durch die Gründung vieler neuer Schulen und einer immer eigenständigeren Rolle der Schulphysik, war es nicht möglich, sämtliche Schulen mit Experimentiermaterialien auszustatten. Pädagogen waren also oft gezwungen, Versuche mit Gegenständen aus dem Haushalt durchzuführen. Es ist also kein Wunder, dass sich eine der ersten öffentlich gemachten Definitionen von Freihandversuchen aus dem Jahr 1905 sehr stark auf die Schule und den Unterricht bezieht. Sie stammt von H. Hahn und ist dem Buch „Physikalische Freihandexperimente“ entnommen.

„Bei der Lösung meiner Aufgabe war es notwendig, die Freihandversuche gegen die eigentlichen Schülerversuche, die Schülerübungen und die Spiele abzugrenzen. Aufgenommen wurden neben den Versuchen mit den Gegenständen des täglichen Gebrauchs auch Versuche mit einfachen Vorrichtungen, die jeder Lehrer selbst herstellen kann, wenn er die Werkzeuge besitzt, die ein gut ausgestatteter Nagelkasten, wie er in jedem Haushalt vorhanden ist, zu enthalten pflegt.“[1]

W. Heyder kommt zwar in seiner Definition auch nicht ohne den Bezug zum Unterricht aus, weist aber dezidiert auf die Möglichkeit, den Freihandversuch auch als Hausversuch durchzuführen hin. So heißt es in seiner Dissertation von 1967:

„Der Freihandversuch ist ein physikalischer Schul- oder Hausversuch, der im Wesentlichen qualitativer Natur ist und durch die Einfachheit der experimentellen Mittel innerhalb und außerhalb des Unterrichtsprozesses leicht ausführbar und jederzeit einsatzfähig ist. Zu seiner Durchführung werden Gegenstände des täglichen Bedarfs und Geräte aus dem Haushalt verwendet. Daneben können auch Lehrmittel einfachster Art eingesetzt werden.“[2]

Aus diesen Definitionen können folgende Merkmale eines Freihandversuches abgeleitet werden: Das Experiment kann...

- ✓ …mit Dingen aus dem täglichen Leben durchgeführt werden.
- ✓ …nach geringer Vorbereitungszeit durchgeführt werden.
- ✓ …auch außerhalb eines Labor, etwa zu Hause durchgeführt werden.
- ✓ …physikalische Inhalte quantitativ zeigen.
- ✓ …aus wenigen Teilen aufgebaut werden.

Als ein wesentliches Charakteristikum eines Freihandversuches gilt der Einsatz von einfachen Dingen als Versuchsmaterial. Nicht unerwähnt darf dabei bleiben, dass die Hand das

[1] Hahn: Physikalische Freihandexperimente Band 1; Verlag Otto Salle Berlin; 1905; S. IV.
[2] Heyder: Die Stellung des Freihandversuchs im System der Experimente des Physikunterrichts und seine Bedeutung für die Entwicklung des Erkenntnisvermögens der Schüler; Dissertation am Pädagogischen Institut Güstrow der Universität Rostock; 1967; S. 42-43.

wichtigste Utensil darstellt. Sie setzt Abläufe in Gang und dient in vielen Versuchen als Stativ und Halterung. Von diesem Standpunkt aus gesehen, ist der Begriff Freihandversuch irreführend und eigentlich falsch, der englische Begriff „hands-on experiment“ scheint treffender zu sein.

1.1.2 Arten von Freihandversuchen

Je nach dem welches der oben genannten Merkmale im Vordergrund steht, kann eine Unterteilung in „Klassische Freihandversuche“, „Low-Cost Versuche“ und „Sekunden Experimente“ getroffen werden.

Klassische Freihandversuche

Klassische Freihandversuche zeichnen sich durch den gänzlichen Verzicht auf teure Geräte aus und werden ausschließlich mit Dingen aus dem Haushalt und dem täglichen Leben durchgeführt.

Low-Cost Versuche

Ein Low-Cost Versuch verwendet ausschließlich einfachste Materialien, deren Anschaffung nicht extra vorgenommen werden muss. Versuchsmaterialien sind weniger Geräte aus dem Haushalt sondern Gegenstände wie Papier und Bleistifte.

Sekunden Experimente

Wie der Name bereits verrät, steht bei diesen Versuchen der Zeitfaktor im Vordergrund. Sowohl die Vorbereitung, als auch die Durchführung darf nicht viel Zeit in Anspruch nehmen. Dabei dürfen auch komplizierte und teurere Geräte verwendet werden, die nicht in jedem Haushalt zu finden sind (Schublehren, Laser, Bogenlampen, flüssiger Stickstoff …).

1.2 Fachdidaktische Aspekte

1.2.1 Gründe für Experimente im Unterricht

Die praktische Bestätigung einer Theorie mittels Experimenten gehört seit Galilei untrennbar zur Methodik der Naturwissenschaften. Experimente sind sowohl beim Erarbeiten neuer Theorien, als auch als Bestätigung von bereits theoretisch formulierten Prinzipien hilfreich. Dies kann auch im naturwissenschaftlichen Horizont der Schülerinnen und Schüler gelten. Experimente eröffnen neue praktische Aspekte und geben so die Möglichkeit, sich intensiver mit dem Sachverhalt auseinanderzusetzen. Vor allem in Schülerexperimenten ergibt sich für Schülerinnen und Schüler die Chance, selbstständig zu arbeiten und in einer „Learning By Doing"- Situation neues Wissen und neue Fertigkeiten zu erarbeiten. Der Lehrplan der AHS trägt dem in Unter- und Oberstufe Rechnung, indem Experimente, auch in Form von Schülerexperimenten, mehrmals explizit erwähnt und gefordert werden. Trotz der Vorteile von Versuchen im Unterricht, egal ob als Schülerexperiment, klassischer Demonstrationsversuch oder als Freihandversuch muss sich ein jeder Lehrer bewusst sein, dass Versuche immer nur ein Aspekt von Physikunterricht sein dürfen. Der Grund dafür liegt im unterschiedlichen Lernverhalten der Schülerinnen und Schüler, womit eben nicht automatisch gesagt ist, dass Versuche bei jeder und jedem den erwarteten Lerneffekt erzielen. Versteht man guten Unterricht als einen Unterricht, der auf die individuellen Bedürfnisse der Klassenmitglieder Rücksicht nimmt, so ist die Anwendung von verschiedenen Sozialformen und Methoden unabdingbar. Darunter können zum Beispiel Lehrervorträge, Einzel-, Partner- und Gruppenarbeiten, Forschungsfragen, Medienarbeiten, Rechnungen und Referate zu verstehen sein. Die Aufgabe der Lehrerin beziehungsweise des Lehrers ist es die richtige Mischung aus diesen Methoden zu finden.

1.2.2 Wann können Experimente eingesetzt werden

<u>Als Einstieg in ein neues Thema</u>

Ein exemplarischer Einstieg in ein neues Thema kann mit einem spannenden Versuch, dessen Resultat nicht unbedingt vorhersehbar ist, bei Schülerinnen und Schülern Interesse für das Thema wecken. Wichtig ist dabei aber, nicht das eigentliche Ziel aus den Augen zu verlieren und auch schon bei diesem Versuch klare Lerninhalte erkennen zu lassen.

Bei der Erarbeitung von neuen Zusammenhängen

Versuche können verwendet werden, um neue Zusammenhänge schrittweise aufzubauen. Die Abhängigkeit oder Unabhängigkeit bestimmter physikalischer Größen kann gezeigt werden, und erst am Ende der Überlegungen steht die Formel, die diese Abhängigkeit bestätigt und exakt beschreibt.

Bestätigung des Erlernten

Eine praktische Anwendung von neu gelernten Inhalten vertieft das Verständnis und kann dazu beitragen, die neuen Erkenntnisse fester zu verankern.

Referate

Das gezielte Ausarbeiten von Versuchen mit anschließendem Vorstellen des Experiments und der Resultate als Referat kann für Schülerinnen und Schüler eine spannende und lehrreiche Aufgabe sein. Aufgabe der Lehrerin beziehungsweise des Lehrers ist es dabei, die Aufgabenstellung klar abzugrenzen und klare Zielvorgaben zu geben.

Prüfungen

Der Einsatz von Versuchen bei jeglicher Art von Überprüfung, also etwa auch im Rahmen der Reifeprüfung kann auf zwei Arten geschehen. Eine Möglichkeit besteht darin, dass Schülerinnen und Schüler bei einem Schülerversuch zeigen müssen, ob sie das Gelernte selbstständig in der Praxis anwenden und bestätigen können. Ein zweite Möglichkeit ist es, im Rahmen der Überprüfung ein Experiment zu zeigen, das anschließend beschrieben und erklärt werden muss.

1.3 Rolle von Experimenten im Hinblick auf den Lehrplan der AHS

Folgende Passagen des Physiklehrplans der AHS Unterstufe verlangen den Einsatz von Experimenten verschiedener Art. Gegenstand der Betrachtung ist der so genannte „neue Lehrplan“ aus dem BGBl. II Nr. 133/2000 für die AHS Unterstufe sowie der Lehrplan aus BGBl. II Nr. 277/2004 für die AHS Oberstufe. Der Absatz „Zur Vertiefung und Erweiterung des Bildungsinhaltes des Pflichtgegenstandes Physik“ bezieht sich auf die im Lehrplan vorgesehene mögliche Vertiefung im Hauptfach oder in einem Wahlpflichtfach.

1.3.1 Aspekte im Physiklehrplan der AHS Unterstufe[3]

Bildungs- und Lehraufgabe:

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

- bewusstes Beobachten physikalischer Vorgänge;
- Verstehen und altersgemäßes Anwenden von typischen Denk- und Arbeitsweisen der Physik;
- 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.

[3] URL:http://www.bmukk.gv.at/medienpool/791/ahs16.pdf[09.05.2007].

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

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. Altersgemäße Denkwege und Deutungsversuche der Schülerinnen und Schüler sind zu berücksichtigen.

1.3.2 Aspekte im Physiklehrplan der AHS Oberstufe[4]

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.
Das Ziel ist der Erwerb folgender Fähigkeiten, Fertigkeiten und Werthaltungen:
-eigenständig arbeiten können

[4] URL: http://www.bmukk.gv.at/medienpool/11862/lp_neu_ahs_10.pdf[09.05.2007].

-einfache Experimente planen und durchführen können
-Gefahren erkennen, einschätzen und sicherheitsbewusst handeln können

Lehrstoff:

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

Zur Vertiefung und Erweiterung des Bildungsinhaltes des Pflichtgegenstandes Physik

Die im Pflichtgegenstand vorgesehenen didaktischen Grundsätze sind im besonderen Maße anzuwenden, vor allem die Ausführungen zum handlungsorientierten Unterricht.

1.4 Der Freihandversuch heute

Der Freihandversuch hat in den letzten hundert Jahren in seiner Bedeutung eine starke Wandlung erfahren. Unsere Schulen sind heute in der Regel modern und gut mit Versuchsmaterialien für Lehrer- und Schülerversuche ausgestattet, womit Freihandversuche nicht wie zu Hahns Zeiten aus Not am Material herhalten müssen. Trotzdem sollten sie noch immer einen Platz im Unterricht haben. Gründe dafür sind:

- ✓ Die geringe Vorbereitungszeit erlaubt es, im Gegensatz zu anderen Versuchen den Versuch öfters und in verschiedenen Unterrichtsstunden zu wiederholen.
- ✓ Die Materialien sollten in jedem Haushalt vorhanden sein, was die Möglichkeit eröffnet, auch ein Experiment als Hausarbeit mitzugeben.
- ✓ Schülerinnen und Schüler können beim Lernen zu Hause Versuche nicht nur aus ihren Aufzeichnungen nachvollziehen, sondern selbst wiederholen.
- ✓ Billige und leicht verfügbare Materialien erlauben es leichter, Schülerversuche in kleinen Gruppen durchzuführen.
- ✓ Freihandversuche bilden eine weitere Facette von Unterricht, womit die Physikstunde abwechslungsreicher gestaltet werden kann.
- ✓ Freihandversuche können den Schülerinnen und Schülern Spaß machen.

Wie bei allen Methoden sollte darauf geachtet werden, den Einsatz von Freihandversuchen nicht zu übertreiben. Eine zu große Zahl an Versuchen verdeckt oft das Wesentliche, führt zu Verwechslungen und mindert das Interesse an Experimenten.

Freihandversuche bieten aber auch die Möglichkeit, Experimente und damit auch Physik aus der Schule hinaus zu bringen und mit Menschen, die nicht unmittelbar im Schulbereich beschäftigt sind, über Naturwissenschaft zu sprechen. Der Boom von populärwissenschaftlichen Büchern und Fernsehsendungen, über deren Niveau und Wissenschaftlichkeit sich freilich diskutieren lässt, weisen aber auf ein grundsätzliches Interesse an naturwissenschaftlichen Phänomenen hin, das aus Sicht der Wissenschaft durchaus positiv ist.

2 Experimenteller Teil

Im Folgenden werden verschiedene Teilgebiete der Thermodynamik behandelt. Da viele Freihandversuche auf denselben physikalischen Prinzipien beruhen, werden immer mehrere Versuche zu einem Abschnitt zusammengefasst. Am Beginn jedes Abschnitts werden die physikalischen Hintergründe beschrieben. Den zweiten Teil eines Abschnitts bilden die einzelnen Experimente. Jedes Experiment enthält für sich eine Auflistung über das nötige Material, Erklärungen zum Aufbau, eine Durchführungsbeschreibung, eine kurze Zusammenfassung der Beobachtung und gegebenenfalls Bilder und Skizzen. Jedes Experiment ist so beschrieben, dass es unabhängig von der Einführung und auch unabhängig von den weiteren Versuchen des Abschnitts durchgeführt werden kann.

Viele Versuche in der Thermodynamik verlangen den Umgang mit offenen Flammen und heißen Flüssigkeiten. Aus diesem Grund sind Schutzmassnahmen vor Verbrennungen und Verbrühungen auch bei Freihandversuchen zu berücksichtigen. Ein Feuerlöscher und eine Schutzdecke sollten bei Experimenten mit offener Flamme immer in Griffweite sein, und die Kleidung muss dem jeweiligen Versuch entsprechend angepasst werden (lange Ärmel, Schutzbrille…). Gerade, wenn ein Versuch gemeinsam mit Schülerinnen und Schülern durch-, oder von diesen vorgeführt wird, dürfen die notwendigen Sicherheitshinweise auf keinen Fall fehlen. Bei Versuchen mit Spiritus ist für ordentliche Durchlüftung des Raumes zu sorgen. Die Versuche sollten nur auf einer feuerfesten Unterlage durchgeführt werden.

2.1 Temperatur und Molekularbewegung

2.1.1 Physikalischer Hintergrund

In vielen Situationen des täglichen Lebens werden anstatt eines exakt definierten Temperaturbegriffes lediglich die Ausdrücke warm und kalt verwendet. Diese sagen aber nichts über die tatsächlichen physikalischen Zustände der Umgebung oder eines Systems aus, sondern sind durch vorgefertigte Erwartungen geprägt oder ein rein subjektives Empfinden. So werden 20°C Mitte Jänner als „warm“ bezeichnet, einzig weil wir uns für diese Jahreszeit Temperaturen dieser Höhe nicht erwarten.

Für die Wissenschaft ist es natürlich notwendig einen anderen, exakteren Begriff für die Temperatur eines Körpers zu definieren. Die entscheidende Frage hierzu ist: Was unterscheidet einen Körper mit bestimmter Temperatur von einem Körper geringerer Temperatur? Beobachtungen mit Mikroskopen zeigen, dass die atomaren Bauteile eines Kristalls bei steigender Temperatur stärker um ihre Gleichgewichtslage zu schwingen beginnen. Auch in Flüssigkeiten und Gasen kann man erhöhte Bewegung der Atome und Moleküle bei höherer Temperatur feststellen. Scheinbar ist also die thermische Bewegung der Atome eines Körpers ein Effekt, dem man als Grundlage für ein Temperaturmaß verwenden kann. Der erste der diese Bewegung der Teilchen indirekt beobachtete, war der Botaniker Robert Brown, der in der ersten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts bei Versuchen an Sporen und Samen in Flüssigkeiten ruckartige und ungeordnete Bewegungen feststellte. Brown notierte diese Erkenntnis zwar, konnte sie aber nicht erklären. Als Albert Einstein 1905 in den Annalen der Physik die Arbeit "Über die von der molekular-kinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen"[5] veröffentlichte, wusste er weder von Browns Beobachtungen noch von Browns vergeblichen Versuchen, diese wissenschaftlich zu begründen. Einstein hatte ebenenfalls diese Taumelbewegungen beobachtet und führte diese auf Zusammenstöße der makroskopischen Partikel mit den sehr viel kleineren Atomen bzw. Molekülen in der Flüssigkeit zurück. Aufbauen konnte er auf der Arbeit von Ludwig Bolzmann bezüglich der kinetischen Gastheorie. Einsteins Überlegungen waren eine weitere Bestätigung für die damals noch nicht von jedem Wissenschafter akzeptierte Atomtheorie. So soll etwa der Österreicher Ernst Mach zu dieser Zeit den Satz *"Zeigen S' mir erst ein Atom"*[6] geprägt haben. Der experimentelle Nachweis der Einsteinschen Überlegungen wurde schließlich von J. Perrin 1908 erbracht. Obwohl also Einstein als erster die Bewegung der Partikel erklären konnte und Perrin den experimentellen Nachweis lieferte, verwendet man heute den Begriff Brownsche Bewegung für diesen Vorgang. Bei einigen physikalischen Experimenten kann man auch Messungenauigkeiten aufgrund der Brownschen Bewegung feststellen, es wäre als falsch, von vornherein die Brownsche Bewegung als mögliche Fehlerquelle einer Messung auszuschließen. So zeigt die untere Abbildung einen einfachen systematischen Aufbau eines Galvanometers mit schwenkbarem Spiegel. Die thermische Bewegung der Luftteilchen führt zu messbaren Schwankungen des Spiegels, die in dem Diagramm zu sehen sind.

[5] Annalen der Physik 17; S. 549-560; 1905.
[6] URL: http://www.diepresse.com/home/techscience/wissenschaft/155690/index.do [29.04.2007].

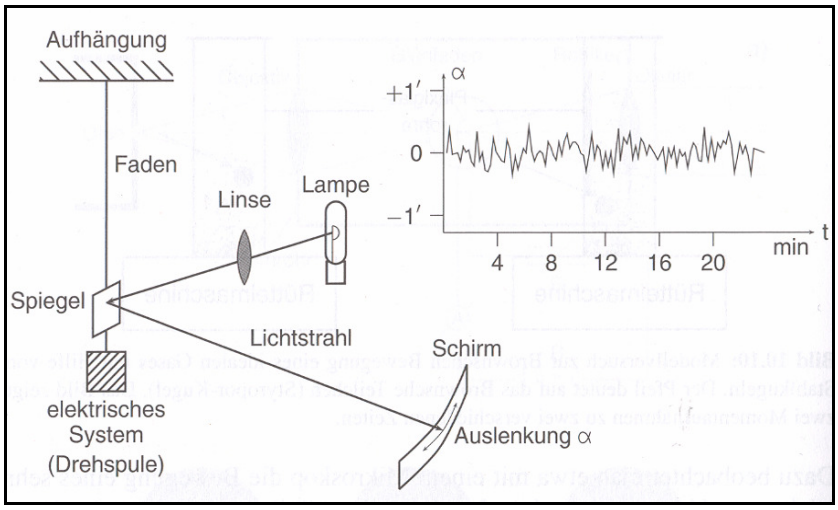

Bild 1: Schwankung des Spiegels eines hochempfindlichen Galvanometers infolge der ungeordneten Bewegung der Luftmoleküle[7].

2.1.2 Zucker löst sich schneller

Material:

- ✓ Overheadprojektor
- ✓ 2 Gläser
- ✓ heißes und kaltes Wasser
- ✓ 2 Zuckerwürfel

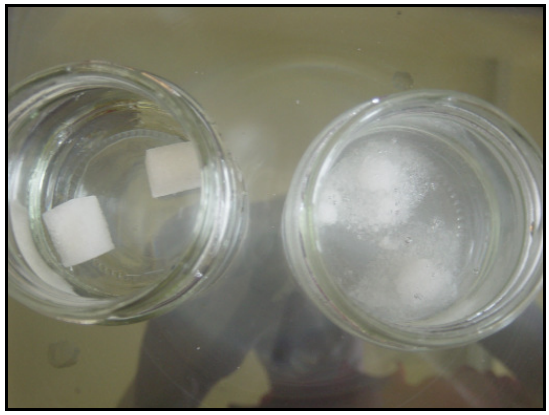

Bild 2: Zuckerwürfel in kaltem (rechts) und warmem (links) Wasser.

Aufbau und Durchführung:

Eines der Gläser wird mit heißem Wasser ca. 3 cm hoch gefüllt, das andere Glas mit derselben Menge an kaltem Wasser. Beide Gläser werden nun auf den eingeschalteten

[7] Dransfeld/Kienle/Kalvius: Physik 1; 9. Auflage; Oldenburg Wissenschaftsverlag; 2001; S. 314.

Overheadprojektor gestellt. Nun wird gleichzeitig je ein Stück Würfelzucker in die Gläser gegeben. Sowohl im Glas, als auch über die Projektion kann man beobachten, dass der Zuckerwürfel im warmen Wasser viel schneller aufgelöst wird. Er zerfällt rasch und es werden sogar kleine Teile weggeschleudert.

Erklärung:

Den beobachteten Effekt nennt man Brownsche Bewegung. Der Unterschied zwischen höherer und niedrigerer Temperatur eines Körpers, einer Flüssigkeit oder eines Gases liegt im Ausmaß der thermischen Bewegung der Atome. Je wärmer ein Stoff ist, umso stärker bewegen sich die Atome, die ihn aufbauen (bei Festkörpern handelt es sich um Schwingungen, anstatt der freien Bewegung der Atome wie in Flüssigkeiten und Gasen). Die sich bewegenden Teilchen stoßen mit dem Zuckerwürfel zusammen, wobei die Zahl der Stöße bei höherer Temperatur natürlich größer ist.

2.1.3 Tee löst sich im Wasser

Material:

- ✓ Zwei Gläser
- ✓ Zwei Teebeutel
- ✓ Heißes und kaltes Wasser

Bild 3: Tee mit kaltem Wasser übergossen (links) und Tee mit warmen Wasser übergossen (rechts).

Bild 4: Die Teegläser aus Bild 1, nach 5 Stunden Wartezeit.

Aufbau und Durchführung:

Beide Gläser werden nebeneinander auf den Tisch gestellt, in ihnen wird jeweils ein Teebeutel mit einem Löffel fixiert. Dann wird das eine Glas mit heißem, das andere mit kaltem Wasser gefüllt. Schon nach kurzer Zeit sieht man, dass sich der Tee im warmen Wasser besser löst. Erst nach mehreren Stunden des Wartens ist auch das kalte Wasser zur Gänze durch den Tee gefärbt.

Erklärung:

Der Grund dafür liegt in der thermischen Bewegung der Wassermoleküle. In einer warmen Flüssigkeit bewegen sich die Moleküle schneller hin und her als in einer kalten. Der Tee im Beutel hat damit mit mehr Wassermolekülen Kontakt und kann sich somit besser und schneller im Wasser verteilen.

2.2 Längenausdehnung von Festkörpern

2.2.1 Physikalischer Hintergrund

Im Allgemeinen dehnt sich ein Körper unter Einwirkung von Wärme aus, dieser Vorgang wird als thermische Ausdehnung oder einfach als Wärmedehnung bezeichnet. Hält man den Druck konstant, so ist die Längenänderung Δl fester Körper von der Länge l des Körpers, seiner Temperatur T und einem stoffspezifischen Wert, dem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten α, abhängig. Es liegt der Zusammenhang

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$$

Formel 2.2-1

vor. Längenänderung und Temperaturänderung sind also linear mit einander verknüpft, aus diesem Grund wird α auch linearer Ausdehnungskoeffizient genannt. Seine Einheit ist 1/ K, der Kehrwert der Temperatur. Der Wert von α ist im Regelfall temperaturabhängig. Aus der oben stehenden Gleichung kann α aus den Größen Δl, l und ΔT ausgedrückt werden. Will man den Wert von α bei einer bestimmten Temperatur, so muss der Grenzübergang

$$\alpha = \lim_{\Delta T \to 0} \left(\frac{\Delta l / l}{\Delta T} \right) = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT}$$

Formel 2.2-2

gebildet werden. α wird üblicherweise als Mittelwert zwischen einer Bezugstemperatur (z.B. 20ºC) und der Endtemperatur, bezogen auf die Länge bei der Bezugstemperatur, angegeben. In den meisten Fällen ist der Wert von α aber auch bei größeren Temperaturintervallen hinreichend genau. Vorstellen kann man sich α als Längenänderung eines Stabes, bezogen auf die Ausgangslänge, bei 1 K Temperaturerhöhung.

Analog kann man auch den Volumenausdehnungskoeffizienten (auch kubischer Ausdehnungskoeffizient) γ definieren. Er beschreibt die Änderung des relativen Volumens pro Temperaturänderung. Die Überlegungen bezüglich der Temperaturabhängigkeit von γ können vom Längenausdehungskoeffizienten übertragen werden. Es gilt:

$$\gamma = \lim_{\Delta T \to 0} \left(\frac{\Delta V / V}{\Delta T} \right) = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT}$$

Formel 2.2-3

Zwischen γ und α besteht der nahe liegende Zusammenhang $\gamma = 3 \cdot \alpha$. Schließlich beschreibt γ dasselbe Phänomen wie α, allerdings in alle drei statt nur in eine Raumrichtung. Zu bemerken ist noch, dass bei gleicher Wärmeeinwirkung über den gesamten Körper die Proportionen erhalten bleiben. Ein Würfel würde unter Wärmeeinfluss nicht zum Quader werden. Die Tabelle zeigt einige mittlere Längenausdehungskoeffizienten für Körper bei 0ºC und einer Erhöhung auf 100ºC.

Stoff	α in 1/K
Aluminium (99,5%)	$23{,}8 \cdot 10^{-6}$
Gusseisen	$10{,}4 \cdot 10^{-6}$
Glas	$(3{,}5 – 8{,}1) \cdot 10^{-6}$
Kupfer	$16{,}5 \cdot 10^{-6}$
Messing (mit 62 % Cu)	$18{,}4 \cdot 10^{-6}$
Stahl (mit 0,2 – 0,6 % C)	$11{,}0 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 1: Längenausdehungskoeffizienten bei Erhöhung von 0°C auf 100°C[8].

Für die Wärmeausdehnung von Flüssigkeiten kann man ein ähnliches Verhalten feststellen Ausnahmen wie bei Wasser sind selten und müssen auf Grund ihres sonderbaren Verhaltens extra betrachtet werden (Kap. 2.12). Freilich macht es nur Sinn, den Volumenausdehnungskoeffizienten zu definieren. Die Tabelle zeigt einige Volumenausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten bei 20°C.

	γ in 1/K
Quecksilber	$18{,}1 \cdot 10^{-5}$
Glyzerin	$50 \cdot 10^{-5}$
Benzin	$106 \cdot 10^{-5}$
Olivenöl	$72 \cdot 10^{-5}$
Essigsäure	$107 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 2: Volumenausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten bei 20°C[9].

[8] Cerbe/Hoffmann: Einführung in die Thermodynamik; 12. Auflage; Carl Hanser Verlag; 1999; S. 29.
[9] Kuchling: Taschenbuch der Physik; 17. Auflage; Carl Hanser Verlag; 2001; Tabelle 11.

2.2.2 Die dicker werdende Münze

Material:

- ✓ 1 kleines Brett
- ✓ 2 Nägel
- ✓ Hammer
- ✓ Münze
- ✓ Kerze
- ✓ Zange, Wäscheklammer oder etwas anderes um die Münze in die Flamme zu halten

Bild 5: Münze nach der Erwärmung.

Aufbau und Durchführung:

Die Nägel werden so in das Brett eingeschlagen, dass die Münze gerade noch zwischen den Nägeln durchfallen kann. Hält man die Münze nun in eine Flamme, so wird sie anschließend nicht mehr durch die Öffnung passen und stecken bleiben. Erst wenn die Münze wieder abgekühlt ist, kann sie wieder durch die Öffnung fallen.

Erklärung:

Die meisten Materialien vergrößern durch Wärmezufuhr ihr Volumen. Diese Wärmezufuhr erfolgt hier über die Flamme der Kerze. Die Münze dehnt sich in alle Raumrichtungen aus und kann nicht mehr durch den Spalt der Nägel fallen. Dieses Volumen ist freilich nur so lange größer, so lange die Münze die Wärme nicht an die Umgebung abgegeben hat. Ist es zum Temperaturausgleich gekommen, nimmt die Münze wieder ihr ursprüngliches Volumen ein und passt wieder durch den Spalt.

2.2.3 Längenausdehnung einer Stricknadel

Material:

- ✓ Stricknadel (oder ein Draht)
- ✓ Nähnadel
- ✓ Papierpfeil
- ✓ Kerze oder Brenner
- ✓ Zwei gleich hohe Flaschen
- ✓ Korken

Bild 6: Die länger werdende Stricknadel.

Aufbau und Durchführung:

Man verkorkt die Flasche, sodass mindestes ein Zentimeter des Korkens aus der Flasche ragt. Senkrecht zur Korkenachse wird nun die Stricknadel in den Korken gesteckt. Der Papierpfeil wird an der Nähnadel befestigt. Diese Nadel kommt auf den Hals der zweiten Flasche. Nun muss die Stricknadel durch Veränderung der Höhe des Korkens so justiert werden, dass die Nähnadel zwischen Stricknadel und Flaschenhals eingeklemmt ist. Die Stricknadel muss auf der Nähnadel aufliegen.

Man beobachtet nun genau den Stand der Pfeilspitze. Hält man eine Flamme unter die Stricknadel, so dehnt sich diese aus und dreht die kleinere Nähnadel. Der Zeiger auf der Nähnadel dreht sich daher weiter. Das funktioniert allerdings nur, wenn die Stricknadel nicht über die Nähnadel hinweg rutscht.

Variante:

Man kann die Stricknadel auch dadurch fixieren, in dem man sie an einem Ende einbiegt und dieses Ende in die geöffnete Flasche steckt. Der Korken ist in diesem Aufbau nicht notwendig.

Erklärung:

Die Wärme der Flamme führt zu einer Längenänderung der Nadel. Diese Änderung ist aber sehr klein. Allerdings kann diese Änderung durch die Nähnadel sichtbar gemacht werden. Wenn der Zeiger am Beginn nach unten gezeigt hat, so wird er sich beim Erwärmen der Nadel in Richtung der anderen Flasche drehen.

Ändert sich die Länge der Nadel um Δl , so dreht sich auch jeder Punkt an der Oberfläche der Nähnadel um genau diesen Weg entlang der Nadeloberfläche kreisförmig weiter. Die Formel für die Bogenlänge lautet (mit Δl als Bogenlänge):

$$\Delta l = \frac{r \cdot \pi \cdot \alpha}{180}$$

Formel 2.2-4

Wobei r der Radius des Bogens, also der halbe Durchmesser der Nähnadel ist und α der Winkel um den sich die Nähnadel weiter dreht. Nach α aufgelöst

$$\alpha = \frac{\Delta l \cdot 180}{r \cdot \pi}.$$

Formel 2.2-5

Verwendet man etwa eine Nähnadel mit 1,6 mm Durchmesser, so ergibt sich für α:

$$\alpha = \Delta l \cdot \frac{180}{0{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot \pi} = \Delta l \cdot 71{,}2\,.$$

Formel 2.2-6

Also bewirkt schon eine Ausdehnung der Stricknadel um 1 mm einen Ausschlag von ca. 70º.

2.2.4 Funktionsweise eines Bimetallstreifens

Material:

- ✓ Wärmequelle (Herdplatte, Kerze, Sonne)
- ✓ Ein mit Aluminium beschichtetes Papier (z. B. aus einer Kaugummi- oder Zigarettenverpackung) oder selbst Papier mit Alufolie zusammenkleben.
- ✓ Wäscheklammer oder Zange

Bild 7: Bimetallstreifen.

Aufbau und Durchführung:

Aus dem Papier wird ein ca. 8 cm langer und 1 bis 2 cm breiter Streifen geschnitten. Mit der Wäscheklammer den Streifen über die Flamme halten. Der Streifen krümmt sich in Richtung der papierbeschichteten Seite.

Variante:

Man wickelt den Streifen um einen runden Bleistift mit der Papierseite innen. Entfernt man den Bleistift, hat man eine Bimetallrolle. Erwärmt man diese nun an einem Ende, so beginnt sich der Streifen auseinander zu drehen.

Erklärung:

Fast alle Materialien ändern ihre Länge unter Wärmezufuhr, was als thermische Ausdehnung bezeichnet wird. Der Ausdehnungskoeffizient gibt an, wie stark sich ein Material bei Wärmezufuhr ausdehnt. Metalle haben einen höheren Ausdehnungskoeffizienten als Papier, also braucht der Metallstreifen im Versuch mehr Platz als der Papierstreifen. Durch die Krümmung in Richtung Papierseite steht dem Metallstreifen mehr Platz zur Verfügung.

Anzumerken ist noch, dass ein Bimetallstreifen eigentlich aus zwei Metallen besteht. Dieser Versuch soll nur die Funktionsweise erläutern, was mit zwei Metallen ob ihrer ähnlichen Ausdehnungskoeffizienten nicht so schnell gezeigt werden kann.

2.2.5 Die länger werdende Gitarrensaite

Material:

- ✓ 2 Stative
- ✓ Draht oder Gitarrensaite
- ✓ Kerze

Bild 8: Die länger werdende Gitarrensaite.

Aufbau und Durchführung:

Man spannt den Draht zwischen den Stativen fest und dehnt ihn so lange, bis man beim Anzupfen einen Ton hört. Nun erwärmt man den Draht sehr vorsichtig mit der Flamme. Wichtig ist den ganzen Draht zu erwärmen, nicht nur eine bestimmte Stelle. Während dem Erwärmen zupft man immer wieder an dem Draht. Der Ton wird immer tiefer.

Erklärung:

Je länger eine Gitarrensaite ist, umso tiefer ist ihr Ton. Die meisten Materialien dehnen sich bei Wärmezufuhr aus, was als thermische Ausdehnung bezeichnet wird. Durch die zugeführte Wärme dehnt sich die Saite, was einen tieferen Ton erzeugt.

2.3 Gasgesetze

2.3.1 Physikalischer Hintergrund

Nun soll der Zusammenhang der Größen Druck p, Temperatur T und Volumen V in Gasen betrachtet werden. Den Überlegungen legt man ein einfaches Modell zugrunde, welches ideales Gas genannt wird. An ein ideales Gas stellt man folgende Bedingungen:

1. Zwischen den einzelnen Teilchen des Gases herrschen, bis auf elastische Stöße keine weiteren Wechselwirkungen. Insbesondere keine Gravitation und keine elektrischen Kräfte.
2. Die Teilchen haben im Vergleich zum Abstand zu einander eine verschwindend kleine Ausdehnung.

In wie weit ist diese Vereinfachung zulässig? Die Dichte von Luft beträgt etwa 1 kg/m³. Die Dichte von Wasser ungefähr 1000 kg/m³. Also hat ein Luftteilchen etwa 1000-mal mehr Raum zur Verfügung als ein Wasserteilchen bei gleicher Masse und gleichem Volumen. In jeder Raumrichtung ist also ein leerer Raum, der etwa 10 Moleküldurchmessern entspricht. Die zweite Bedingung scheint also erfüllt. Die Gravitation spielt bei derartig kleinen Massen praktisch keine Rolle und kann vernachlässigt werden. Damit bleiben nur noch mechanische Stöße als Wechselwirkung zwischen den Teilchen des Gases.

Was bedeutet nun die Größe Druck bei einem Gas? Man kann ja nicht wie in der Mechanik den Druck als Quotient von drückender Kraft und der Fläche auffassen. Isaac Newton ordnete den Gasmolekülen abstoßende Kräfte zu, die den Druck auf die Gefäßwände bewirkten. Erst in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts setzte sich langsam die Theorie des Schweizer Mathematikers Daniel Bernoulli durch, der den Gasdruck auf die thermische Bewegung der Moleküle zurück führte. Betrachtet man ein mit Gas gefülltes Gefäß, so haben die Moleküle des Gases ständig kurze Kontakte mit der Gefäßwand. Bei diesem Kontakt wird das Teilchen reflektiert und übt einen kleinen Druck auf die Wand aus. Zwar bewirkt jedes Teilchen für sich nur einen verschwindend kleinen Druck, summiert man aber die große Zahl aller Teilchen in einem Gas, so darf der Druck nicht mehr ignoriert werden.

Für die nun folgende Überlegung nimmt man an, dass alle Teilchen mit derselben Geschwindigkeit durch einen Würfel fliegen. Dies entspricht in der Realität natürlich nicht der Wahrheit, man kann aber diese Geschwindigkeit als mittlere Geschwindigkeit aller Teilchen auffassen. Ebenso nimmt man an, dass der Druck auf die Würfelwand zu jedem Zeitpunkt dt konstant ist. Zerlegt man nun die Bewegungsrichtung der Moleküle in Komponenten parallel zu den Würfelkanten, so entstehen sechs mögliche Bewegungsrichtungen, von denen keine gegenüber den anderen bevorzugt ist. Also bewegt sich je ein Sechstel der Teilchen gerade senkrecht auf jeweils eine Würfelseite zu. Ein Teilchen habe die durchschnittliche Masse m und bewege sich mit der Durchschnittsgeschwindigkeit v normal Richtung Würfelwand. Der Impuls vor dem Stoß ist $m \cdot v$. Bei senkrechtem Aufprall wird das Teilchen reflektiert und hat den Impuls $-m \cdot v$ jeweils bezogen auf die Richtung normal zur Wand. Die Impulsänderung dp eines Teilchens ist also $2 \cdot m \cdot v$. Im Zeitintervall dt erreichen genau jene Teilchen die Wand, die von ihr nicht weiter als $v \cdot dt$ entfernt sind (bei angenommener konstanter Geschwindigkeit). Hat der ganze Würfel ein Volumen V und eine Teilchenzahl N so befindet sich in einem Kubikmeter eine Zahl von (N/V) Teilchen. Über einer Fläche A der betrachteten Würfelwand befinden sich also $(N/V) \cdot A \cdot v \cdot dt$ Teilchen, von denen sich ein Sechstel in Richtung der Wand bewegt. Der Ausdruck $A \cdot v \cdot dt$ beschreibt den Quader mit der Höhe $v \cdot dt$ über der Fläche A. So ergibt die Gesamtimpulsänderung dP folgendes:

$$dP = \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{N}{V} \cdot A \cdot v \cdot dt \right) \cdot 2m \cdot v = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot m \cdot v^2 \cdot A \cdot dt \,.$$

Formel 2.3-1

Die Kraft auf das Wandstück der Fläche A ist die Impulsänderung pro Zeiteinheit. Für den Druck ergibt sich also:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot m \cdot v^2 \,.$$

Formel 2.3-2

Der Begriff Druck eines Gases ist damit erklärt. Die Einheit ist N/m^2, was als ein Pascal bezeichnet wird. Fasst man nun den Druck p als Funktion von V auf so kann man folgenden Schluss ziehen: Die mittlere Geschwindigkeit v der Teilchen ist ein Maß für die Temperatur des Gases. Hält man diese konstant, so kann man auch die Geschwindigkeit der Teilchen als konstant ansehen. Damit besteht aber zwischen p und V der Zusammenhang:

$$p \sim \frac{1}{V} \text{ b. z. w. } p \cdot V = konst.$$

Formel 2.3-3

Diesen Zusammenhang entdeckte zuerst Robert Boyle (1662) und unabhängig von ihm Edme Mariotte (1676), weshalb dieses Gesetz heute das Gesetz von Boyle-Mariotte genannt wird. Im Speziellen gilt natürlich für zwei Zustände (V_1, p_1) und (V_2, p_2) die Beziehung:

$$V_1 \cdot p_1 = V_2 \cdot p_2$$

Formel 2.3-4

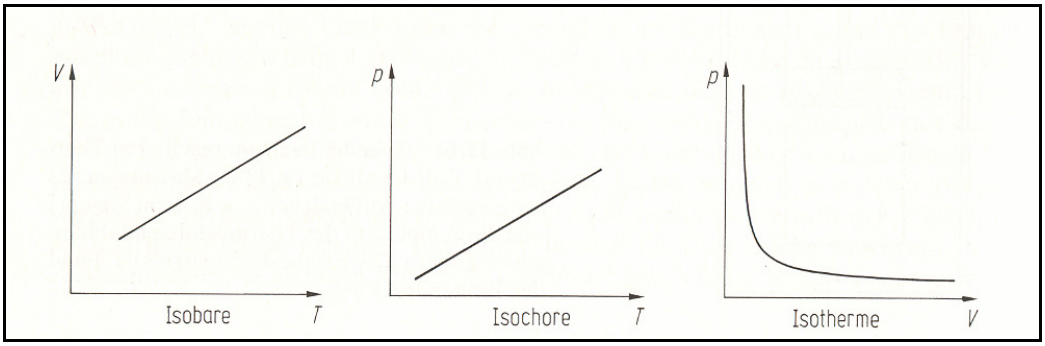

Bild 9: (V, T)-, (p, T)-, (p, V)-Diagramme an verdünnten Gasen. Die jeweils dritte Zustandsvariable p, V, T wird konstant gehalten[10].

Der Graph ist eine Hyperbel, die als Isotherme bezeichnet wird (isos = gleich, griechisch). Analog dazu wird die Zustandsänderung als isotherme Zustandsänderung bezeichnet, also eine Volumensänderung bei gleicher Temperatur. Dem System muss also Wärme zu- oder abgeführt werden. Eine Expansion des Gases etwa verlangt eine Wärmezufuhr, die nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik gegeben ist durch

$$Q_{1,2} = (U_2 - U_1) - W_{1,2}$$

Formel 2.3-5

Die Änderung der inneren Energie beträgt null, also kommt die ganze zugeführte Wärme der Volumsarbeit zu.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Zustandsänderungen bei konstantem Volumen durchzuführen. Nimmt man wieder die oben stehende Gleichung zu Hilfe, so beseht bei diesen so genannten isochoren Zustandsänderungen ein direkter Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Druck im Inneren des Gases.

[10] Bergmann/Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik; 11. Auflage; Walter de Gruyter; 1998; S. 1010.

$$p \sim T \text{ b. z. w. } \frac{p}{T} = konst.$$

Formel 2.3-6

Dieser Zusammenhang wird den französischen Physikern Louis Joseph Gay Lussac (1778-1850) und zuvor schon von Jacques Charles (1746-1823) zugeschrieben und heute Gesetz von Gay-Lussac genannt.

Im allgemeinen Fall werden Zustandsänderungen aber weder bei konstantem Volumen, noch bei konstantem Druck oder konstanter Temperatur stattfinden. Nimmt man in der Gleichung

$$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot m \cdot v^2$$

Formel 2.3-7

die Durchschnittsgeschwindigkeit der Teilchen als Maß für die Temperatur, kann man folgenden Zusammenhang herstellen:

$$p \cdot V = k_B \cdot N \cdot T$$

Formel 2.3-8

In dem N die Zahl der Teilchen darstellt und k_B die Bolzmann-Konstante als Proportionalitätskonstante ist. Der Wert von k_B beträgt $1{,}381 \cdot 10^{-23}$ J/K. Häufig bezieht man sich bei der Angabe der Teilchenanzahl N aber nicht auf die tatsächliche Zahl der Teilchen sondern man gibt die Anzahl der Mole n im Gas an. Ein Mol enthält $6{,}022 \cdot 10^{23}$ Teilchen, was als die Avogadro-Zahl N_A bezeichnet wird. Die Teilchenanzahl N in einem Gas kann also durch $n \cdot N_A$ ersetzt werden. Man erhält:

$$p \cdot V = k_B \cdot \mathrm{n} \cdot \mathrm{N_A} \cdot T$$

Formel 2.3-9

Die beiden Konstanten N_A und k_B können zu einer Konstanten vereint werden, die mit R bezeichnet wird und die Bezeichnung universelle Gaskonstante trägt. Man erhält die Zustandsgleichung idealer Gase

$$p \cdot V = \mathrm{n} \cdot \mathrm{R} \cdot T$$

Formel 2.3-10

mit R= 8,314 J/(mol·K). Man sieht, die Gesetze von Gay-Lussac und Boyle-Mariotte sind Spezialfälle dieser Gleichung, wenn man V bzw. T konstant hält.

All diese Überlegungen gelten nur bei niedrigem Druck. Wird der Druck zu stark erhöht, so rücken die Gasteilchen immer näher zusammen. Am Anfang der Überlegung stand aber die Voraussetzung, eine möglichst große Distanz zwischen den Teilchen zu haben. Bei Luft und luftähnlichen Gasen macht sich diese Abweichung bei einem Druck von etwa 400 bar bemerkbar. Ebenso wurde in keiner Überlegung berücksichtig ob das Gas bei den gegebenen Zustandsgrößen den Aggregatzustand ändern würde, in dem es etwa kondensiert.

2.3.2 Das Münzventil

Material:

- ✓ Glasflasche
- ✓ Münze, die die Öffnung der Flasche vollständig abdeckt
- ✓ Kaltes Wasser

Bild 10: Münzventil.

Aufbau und Durchführung:

Die Flasche wird mit dem kalten Wasser ordentlich gekühlt. Anschließend wird die Öffnung der leeren Flasche befeuchtet und mit der Münze verschlossen. Nun umfasst man mit beiden Händen die Flasche und wartet, bis die Körperwärme den Inhalt der Flasche erwärmt hat. Die Luft in der Flasche benötigt ein größeres Volumen und hebt die Münze von Zeit zu Zeit kurz an.

Erklärung:

Die Flasche ist ein Gefäß mit konstantem Volumen. Beim Erwärmen mit den Händen beginnt sich die Luft in der Flasche zu erwärmen. Nach dem Gesetz von Gay-Lussac erhöht sich neben der Temperatur auch der Druck innerhalb der Flasche. Dieser Druck richtet sich als Kraft gegen die Gefäßwand, also gegen die Flasche und die Münze. Ist der Druck groß genug um das Gewicht der nach unten drückenden Münze auszugleichen, kann die Luft die Münze anheben. Dabei entweicht ein Teil der erwärmten Luft, was einen Rückgang des Drucks in der Flasche bewirkt. Die Münze bleibt also wieder auf der Flasche liegen, bis der Druck durch die Wärmezufuhr wieder groß genug ist, um sie erneut zu heben.

2.3.3 Flaschenimplosion

Material:

- ✓ Heißes Wasser
- ✓ Kaltes Wasser
- ✓ Eine Plastikflasche mit Verschluss
- ✓ Eine Wanne oder ein Waschbecken

Bild 11: Erwärmte Plastikflasche nach der Abkühlung in kaltem Wasser.

Aufbau und Durchführung:

Man füllt etwas heißes Wasser in die Flasche, schüttelt diese gut und entleert anschließend die Flasche und setzt denn Verschluss darauf. Dann legt man die Flasche in die mit kaltem Wasser gefüllte Wanne. Nach kurzer Zeit kann man sehen, wie die Flasche eingedrückt wird. Alternativ kann man die die Flasche anstatt in kaltes Wasser auch in den Kühlschrank legen.

Erklärung:

Das warme Wasser in der Flasche erwärmt auch die Luft in ihr. Beim Abkühlen sinkt neben der Temperatur auch der Druck der eingeschlossenen Luft gemäß dem Gesetz von Gay-Lussac. Von außen kann keine Luft eindringen, was einen Unterdruck in der Flasche im Vergleich zur Umgebung erzeugt. Auf die Flasche wird also von innen her ein kleinerer Druck also von außen ausgeübt, was zur Deformation führt.

2.3.4 Der neugierige und der schüchterne Luftballon

Material:

- ✓ Luftballon
- ✓ Glasflasche
- ✓ Heißes und kaltes Wasser
- ✓ Topf
- ✓ Herdplatte
- ✓ Eventuell Kühlschrank

Bild 12: Der neugierige Luftballon vor der Erwärmung.

Bild 13: Der neugierige Luftballon nach der Wärmezufuhr.

<u>Aufbau und Durchführung:</u> Der neugierige Luftballon

Zuerst muss die Flasche gut gekühlt werden. Entweder indem man sie ein zeitlang unter kaltes Wasser hält oder sie vor dem Experiment im Kühlschrank aufbewahrt. Dann wird über den Hals der Flasche ein Luftballon gesteckt. Stellt man nun die Flasche in ein Wasserbad und erhitzt diese, so richtet sich der Luftballon auf der Flasche auf.

Bild 14: Der schüchterne Luftballon vor der Abkühlung.

Bild 15: Der schüchterne Luftballon nach der Abkühlung.

Aufbau und Durchführung: Der schüchterne Luftballon

Nun wird die Flasche mit heißem Wasser gefüllt und geschüttelt. Das Wasser wird wieder ausgeleert und anschließend, wird auf die so erwärmte leere Flasche der Luftballon aufgesetzt. Hält man nun die Flasche unter kaltes Wasser, so wird der Luftballon in die Flasche gezogen. Alternativ dazu kann die Flasche auch in den Kühlschrank gestellt werden.

Erklärung:

Beide Teile dieses Experiments können mit den Gasgesetzen erklärt werden. Hat man eine abgeschlossene Menge an Gas, wie sie hier in beiden Fällen vorliegt, so hängen die Größen Druck, Volumen und Temperatur eng zusammen und erfüllen die Proportion $p \cdot V \sim T$.

Erwärmt man ein Gas, so muss auch der Druck oder das Volumen größer werden. Verstehen kann man das, indem man sich vorstellt, die Teilchen brauchen aufgrund ihrer erhöhten thermischen Bewegung mehr Platz oder drücken stärker auf das Gefäß. Durch die Dehnbarkeit des Luftballons auf der Flasche kann sich die Luft in der Flasche in den Leerraum ausdehnen, was den Luftballon im ersten Teil aufgerichtet hat. Der umgekehrte Effekt verursacht das Verhalten des Ballons im zweiten Teil des Experiments. Die warme Luft wird durch das kalte Wasser abgekühlt und zieht sich somit zusammen. Der Luftballon wird in die Flasche gezogen und verkleinert somit das Volumen.

Variante:

Bei Flaschen mit größerer Öffnung kann der Luftballon durch eine Gummihaut als Membran ersetzt werden. Das Erwärmen bzw. das Abkühlen bewirkt dann eine Wölbung der Membran

nach außen bzw. innen. Der Effekt ist zwar nicht so deutlich zu erkennen wie beim Luftballon, dafür ist die nötige Temperaturschwankung nicht so groß.

2.3.5 Korkenknallen

Material:

- ✓ Leere Glasflasche mit Korken
- ✓ Brenner
- ✓ Halterung

Aufbau und Durchführung:

Man verschließt die Flasche mit dem Korken, füllt aber vorher etwas Wasser in die Flasche. Hält man nun die Flasche über den Brenner, so sollte der Korken wie bei einer Sektflasche aus der Flasche springen.

Erklärung:

Nach dem Gasgesetz von Gay-Lussac ist das Verhältnis von Druck und Temperatur einer abgeschlossenen Menge Gas bei festem Volumen konstant. Die Wärme, die über den Brenner der Flasche zugeführt wird, bringt also eine unweigerliche Erhöhung des Drucks in der Flasche mit sich. Die Teilchen bewegen sich ob ihrer Temperatur schneller und erzeugen so mehr Druck auf die Gefäßwand. Zusätzlich gehen auch noch Teilchen aus dem Wasser in den gasförmigen Zustand über. Die Teilchenanzahl im Gas erhöht sich also, was den Druck noch weiter vergrößert. Der Druck wiederum erzeugt eine Kraftwirkung auf das Glas und den Korken. Ist diese Kraft groß genug um den Korken aus der Flasche zu drücken, so springt er heraus.

2.3.6 Luft im Glaskolben

Material:

- ✓ Rundkolben mit längerem Glasrohr
- ✓ Behälter mit Wasser
- ✓ Kerze

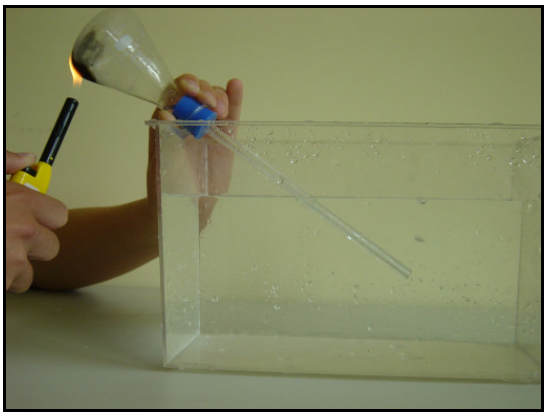

Bild 16: Erwärmung der in einem Kolben eingeschlossenen Luft.

Aufbau und Durchführung: Teil 1

Der Kolben wird so gehalten, dass das Glasrohr in vollständig ins Wasser taucht. Nun erhitzt man den Kolben mit der Kerze. Bald beginnen am unteren Ende des Glasrohres kleine Luftblässchen aufzusteigen.

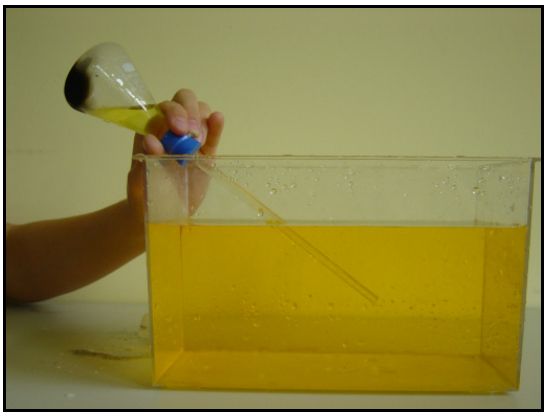

Bild 17: Abkühlung der eingeschlossenen Restluft aus dem vorherigen Bild. (Wasser wurde zur besseren Demonstration mit Tinte gefärbt).

Aufbau und Durchführung: Teil 2

Jetzt entfernt man die Flamme, lässt aber die Öffnung des Glasrohres weiterhin die ganze Zeit unter Wasser. Die Luft im Kolben soll jetzt abkühlen. Unterstützt kann dieser Vorgang werden, indem man den Kolben nicht mit der ganzen Hand umfasst und ihn eventuell mit kalten Gegenständen in Berührung bringt. In der Zeit des Abkühlens muss man darauf acht geben, dass aus dem Kolben keine Luft austreten kann. Mit der Zeit beginnt das Wasser im Glasrohr langsam zu steigen. Dieser Effekt ist umso deutlicher zu erkennen, je kleiner der Durchmesser des Rohres ist.

Erklärung:

Nach dem universellen Gasgesetz hängen die Größen Druck, Volumen und Temperatur eines Gases eng zusammen und erfüllen die Proportion $p \cdot V \sim T$. Erhöht man also die Temperatur durch Wärmezufuhr, so erhöht sich auch der Druck und/oder das Volumen. In diesem Experiment dehnt sich das Gas zuerst aus bis es an die untere Grenze des Glasrohres kommt und steigt dann in Form von kleinen Bläschen durch das Wasser auf. Im zweiten Teil wird das warme Gas im Kolben abgekühlt und mit der fallenden Temperatur fällt auch der Druck im Kolben. Das Gas drückt also weniger stark auf die Wasseroberfläche am unteren Rand des Glasrohres. Der Druck der Atmosphäre auf das Wasser bleibt natürlich unverändert und der resultierende Druck drückt das Wasser in das Rohr.

2.3.7 Ein Dampfboot

Material:

- ✓ Kupferrohr (von Zigarrenhülse)
- ✓ Wasser
- ✓ Holzplatte
- ✓ Teelichter
- ✓ Kleine Holzstücke
- ✓ Wanne

Aufbau und Durchführung:

Aus der Holzplatte wird zuerst ein kleines Boot gebaut. Hierzu wird auf die Platte mit den anderen Holzstücken eine Vorrichtung gebaut, auf der man das Kupferrohr befestigen kann. Die Höhe der Vorrichtung wird so gewählt, dass die Teelichter noch bequem unter dem Rohr Platz finden. Das Rohr wird mit etwas Wasser gefüllt und verschlossen. Nun sticht man am unteren Ende ein kleines Loch in das Rohr und befestigt es auf der dafür gebauten Vorrichtung. Nun stellt man das Boot in eine Wanne und entzündet die Teelichter. Das Boot bewegt sich langsam über das Wasser.

Erklärung:

Das Wasser im Kupferrohr beginnt wegen der zugeführten Wärme zu verdampfen und strömt aus dem Loch am unteren Ende des Rohres. Der Rückstoß dient als Antrieb für das Boot.

2.3.8 Die implodierende Dose

Material:

- ✓ leere Getränkedose
- ✓ Haltezange (z.B. Grillzange)
- ✓ Wanne
- ✓ Brenner
- ✓ Wasser

Bild 18: Erwärmung einer Dose über dem Brenner.

Bild 19: Die implodierte Dose.

Aufbau und Durchführung:

Die Wanne wird mit Wasser gefüllt und neben den Brenner gebracht. Die Dose wird ca. 1 cm hoch mit Wasser gefüllt und mit der Haltezange über die Flamme gehalten, so bringt man das Wasser in der Dose zum Sieden. Dann führt man die Dose rasch mit der Zange in das Wasser der Wanne, wobei man die Dose dabei dreht bis die Öffnung nach unten zeigt. Sofort nach dem Kontakt mit dem kälteren Wasser der Wanne implodiert die Dose.

Erklärung:

Beim Erhitzen entsteht in der Dose Wasserdampf, der sich beim Abkühlen in der Wanne augenblicklich zusammenzieht und sogar kondensiert. Der komprimierte Wasserdampf bzw. das kondensierte Wasser verringern den Druck, der in der Dose herrscht. Die Luft der Atmosphäre aber drückt weiter mit der gleichen Kraft auf die Dose, bei der jetzt aber der innere Gegendruck fehlt.[11]

2.3.9 Ein Thermometer

Material:

- ✓ Durchsichtiger Trinkhalm oder ein Glasröhrchen
- ✓ Klebeband
- ✓ Warmes Wasser
- ✓ Tinte
- ✓ Glas

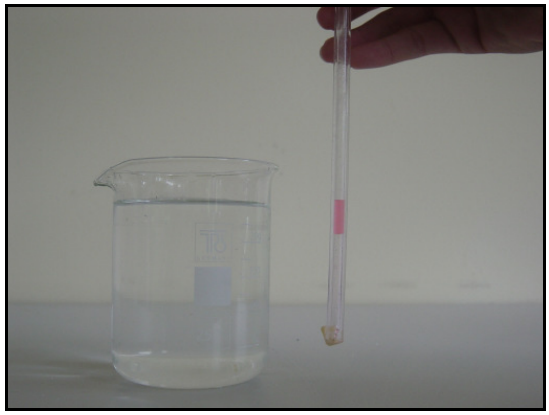

Bild 20: Ein Glasröhrchen als Thermometer.

Aufbau und Durchführung:

Mit der Tinte wird das Wasser gefärbt. Nun bringt man einen Tropfen des gefärbten Wassers in den Trinkhalm, knickt diesen und verschließt die Öffnung mit dem Klebeband. Hält man nun den Trinkhalm mit der verschlossenen Seite in warmes Wasser, so klettert der Tropfen im Halm nach oben.

[11] vgl. Rentzsch: Experimente mit Spaß- Wärme; 1. Auflage; Verlag Hölder-Pichler-Tempsky; S. 68.

Erklärung:

Über dem Tropfen herrscht ein Druck, der vom Luftdruck der Umgebung herrührt, unter dem Tropfen ein Druck, der vom Volumen, der Menge und der Temperatur der eingeschlossenen Luft bestimmt wird. Es gilt die universelle Gasgleichung

$$p \cdot V = \mathrm{n} \cdot \mathrm{R} \cdot T$$

Formel 2.3-11

Da die Luft unter dem Wassertropfen eingeschlossen ist, kann die Gasmenge als konstant angenommen werden. Damit entsteht die Proportion p·V~T. Durch das warme Wasser im Glas wird die Luft unter dem Tropfen erwärmt und erhöht den Druck von unten auf den Tropfen. Der Druck an der Oberseite bleibt natürlich gleich, was als Resultat eine Verschiebung des Tropfens nach oben bewirkt. Der Druck muss nur groß genug sein, um das Gewicht des Wassertropfens zu heben. Bei sehr dünnen Trinkhalmen kann auch der Kapillareffekt eine Rolle spielen und bei größeren Temperaturschwankungen muss auch der Dampfdruck berücksichtigt werden.

2.4 Gummi unter Wärmeeinfluss

2.4.1 Physikalischer Hintergrund

Die Erfahrung zeigt, dass sich Stoffe im Allgemeinen bei höherer Temperatur ausdehnen. Gedehnter Gummi allerdings macht bei Wärmezufuhr genau das Gegenteil, weil er sich stärker zusammen zieht. Gummi besteht aus vielen langkettigen Polymermolekülen, die stark miteinander vernetzt sind. Polymere sind Stoffe die durch eine Kette eines oder mehrerer gleicher oder gleichartiger Atome gebildet werden, wobei auch noch weitere Eigenschaften gefordert werden. Eine genaue Definition kann etwa im „Gesetz zum Schutz vor gefährlichen Stoffen“ der Bundesrepublik Deutschland §3 gefunden werden.[12]

Belastet man nun einen Gummistab der Länge L_0 mit einer Zuglast P so wird der Stab in Zugrichtung gedehnt und er hat eine neue Länge L. Der Deformationsgradient in Zugrichtung ist

$$F_{11} = \lambda = \frac{L}{L_0}$$

Formel 2.4-1

Für die Querkontraktion gilt

$$F_{22} = F_{33} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\frac{L_0}{L}}\,.$$

Formel 2.4-2

Hat beispielsweise ein quaderförmiger Stab die Maße x_0, y_0, L_0 so hat er das Volumen $V_0 = x_0 \cdot y_0 \cdot L_0$. Belastet nun P den Stab, so erhält man die neuen Längen x, y, L in dem man die alten Längen mit den entsprechenden Gradienten multipliziert. Nun wird gezeigt, dass sich dabei das Volumen des Stabes nicht ändert.

$$V = x \cdot y \cdot L = x_0 \cdot \sqrt{\frac{L_0}{L}} \cdot y_0 \cdot \sqrt{\frac{L_0}{L}} \cdot L_0 \cdot \frac{L}{L_0} = x_0 \cdot y_0 \cdot L_0 \cdot \frac{L_0}{L} \cdot \frac{L}{L_0} = x_0 \cdot y_0 \cdot L_0 = V_0$$

Formel 2.4-3

Betrachtet man die Entropie des Stabes so ist sie gleich der Summe der Entropien der Polymermoleküle. S_0 ist die Entropie des unbelasteten Stabes, S die des gedehnten Stabes.

[12] URL: http://bundesrecht.juris.de/chemg/__3.html [09.01.2007].

$$S = k \cdot n \cdot \left(N \cdot \ln(4 \cdot \pi \cdot Z) - \left(\frac{\lambda^2}{2} + \frac{1}{\lambda} \right) \right)$$

Formel 2.4-4: Entropie eines gedehnten Stabes[13]

$$S_0 = k \cdot n \cdot \left(N \cdot \ln(4 \cdot \pi \cdot Z) - \frac{3}{2} \right)$$

Formel 2.4-5: Entropie eines ungedehnten Stabes[14]

Der Graph zeigt $S\text{-}S_0$ als Funktion von λ. Er erreicht das Maximum mit $\lambda = 1$, was dem ungedehnten Zustand gleich kommt. Scheinbar ist die Entropie im unbelasteten Zustand größer als im Gedehnten. Algebraisch kann man dies nachweisen, indem man den Term

$$\frac{\lambda^2}{2} + \frac{1}{\lambda}$$

Formel 2.4-6

nach λ differenziert und die Extremwertaufgabe löst.

$$\lambda - \lambda^{-2} = 0 \rightarrow \lambda = 1$$

Formel 2.4-7

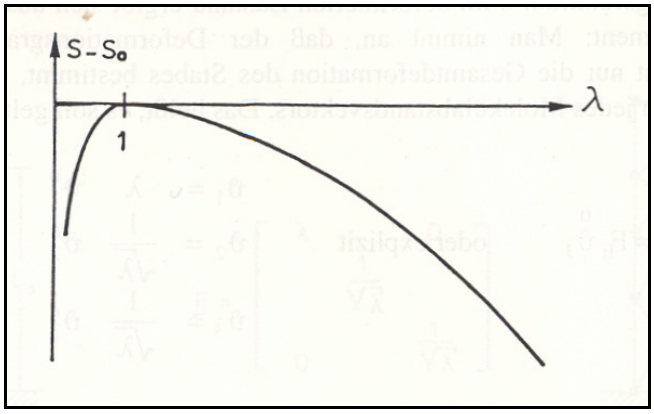

Bild 21: Die Entropie eines Gummistabes als Funktion der Deformation λ[15].

Wärmezufuhr bedeutet immer eine Erhöhung der Entropie. Also wird sich ein gedehnter Gummi beim Erwärmen zusammenziehen.

[13] Müller: Grundzüge der Thermodynamik; 2. Auflage; Springer; 1999; S.160.
[14] Müller: Grundzüge der Thermodynamik; 2. Auflage; Springer; 1999; S.160.
[15] Müller: Grundzüge der Thermodynamik; 2. Auflage; Springer; 1999; S.160.

2.4.2 Gummi zieht sich beim Erwärmen zusammen

Material:

- ✓ Gummiring
- ✓ Haarfön
- ✓ Ein kleines Gewicht, das man an den Gummiring hängen kann
- ✓ Stativ um den Gummiring aufzuhängen (Türschnalle)
- ✓ Kreide oder Stift

Bild 22: Gedehnter Gummi.

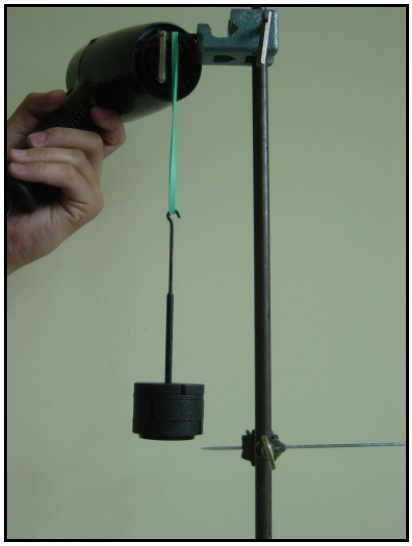

Bild 23: Gedehnter Gummi unter Einwirkung eines Wärmestroms.

Aufbau und Durchführung:

Der Gummiring wird am Stativ (Türschnalle) aufgehängt und das Gewicht an den Gummi gehängt. Das Gewicht ist dabei so zu wählen, dass es den Gummi nicht zu sehr dehnt. Mit der Kreide wird nun am Stativ (Türe) das untere Ende des Gewichts markiert. Nun schaltet man den Fön auf die wärmste Stufe und föhnt damit den Gummi. Von vorne sieht man, wie sich das Gewicht beim Erwärmen über die Markierung bewegt.

Erklärung:

Gummi besteht aus langen Polymermolekülen, die stark ineinander verschlungen sind. Wird der Gummi nun gedehnt, so werden die Moleküle in die Länge gezogen und entwirrt. Die Zugkraft beim Dehnen bringt also Ordnung unter die Moleküle, was einer Verringerung der Entropie gleich kommt. Wärmezufuhr bedeutet aber immer eine Erhöhung der Entropie. Der Gummiring versucht also wieder in den Zustand zurückzukehren, in dem die Unordnung größer war, und dies ist der ungedehnte.

2.5 Spezifische Wärmekapazität

2.5.1 Physikalischer Hintergrund

Führt man einer Substanz mit Masse m Energie ΔQ in Form von Wärme zu, so erhöht sich im Allgemeinen ihre innere Energie ΔU oder die zugeführte Energie wird in Volumsarbeit umgesetzt und das Volumen der Substanz wird vergrößert. Hält man das Volumen konstant und misst die dadurch entstandene Temperaturerhöhung ΔT, so ergibt sich die Proportion

$$\Delta Q \approx m \cdot \Delta T \ .$$

Formel 2.5-1

Als Proportionalitätskonstante wird die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen c_v eingeführt. Sie gibt jene Wärmemenge an, die notwendig ist um 1kg eines Stoffes um die Temperatur 1 K zu erhöhen. Die Dimension von c_v ist ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$).

$$\Delta Q = m \cdot \Delta T \cdot c_v$$

Formel 2.5-2.

Früher wurde als Einheit für die Wärme die Kalorie verwendet, die definiert war als jene Wärmemenge die 1 g Wasser von 14,5ºC auf 15,5ºC erwärmt. Allerdings sind mechanische Arbeit und Wärme zueinander äquivalent und deshalb kann auch für die Wärme die Einheit der Arbeit 1 Joule verwendet werden. Dieser Zusammenhang wird mechanisches Wärmeäquivalent genannt.

$$1 \text{ cal} = 4{,}184 \text{ J}$$

Ebenso kann man eine spezifische Wärmekapazität für konstanten Druck definieren. Um den Druck p bei Wärmezufuhr konstant zu halten, muss sich im Allgemeinen das Volumen verändern. Die Energie zur Volumsänderung wird aus der zugeführten Wärme entzogen. Damit braucht man mehr Wärme um einen Stoff bei konstantem Druck um 1 K zu erhöhen als bei konstantem Volumen, und damit ist die Größe c_p immer größer als c_v.

$$\Delta Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T = \Delta U + p \cdot \Delta V = \mathrm{c_v} \cdot m \cdot \Delta T + p \cdot \Delta V$$

Formel 2.5-3

Da die Beziehung $c_p > c_v$ immer gilt, hat das Verhältnis $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ immer Werte die größer als 1 sind. Speziell für ideale Gase gilt:

$$\kappa = \begin{bmatrix} 1{,}66 \rightarrow \textit{einatomige} \\ 1{,}40 \rightarrow \textit{zweiatomige} \text{ Gase.} \\ 1{,}33 \rightarrow \textit{mehratomige} \end{bmatrix}$$

Formel 2.5-4[16]

Bei Festkörpern und Flüssigkeiten ist die Volumsänderung durch die Erwärmung sehr gering und κ wird ungefähr 1 sein. Bei Gasen sieht die Situation allerdings ganz anders aus. Es ist sehr leicht während der Erwärmung das Volumen konstant zu lassen. Um den Druck konstant zu halten ist aber eine nicht unwesentliche Vergrößerung des Volumens notwendig. Das bedeutet, dass κ bei Gasen einen größeren Wert haben wird. Die spezifische Wärmekapazität ist, ausgenommen beim einatomigen Gas, auch temperaturabhängig. Die Veränderlichkeit der spezifischen Wärmekapazität ist mit einfachen algebraischen Mitteln jedoch nicht erfassbar. Daher verwendet man zum Rechnen einen Mittelwert der spezifischen Wärmekapazität im Temperaturintervall.

Weiters kann man noch die molare Wärmekapazität C_M definieren, die angibt, welche Wärmemenge man bei konstantem Volumen zuführen muss, um ein Mol eines Stoffes um 1 K zu erhöhen. Sie ist das Produkt aus Molmasse und spezifischer Wärmekapazität.

Vergleicht man die Werte für die spezifische Wärmekapazität verschiedener Stoffe miteinander, so fällt einem unweigerlich der hohe Wert für Wasser auf. Dieser ist etwa zehnmal so hoch wie die der meisten Metalle. Diese hohe Wärmekapazität dient als Grundlage der Kalorimetrie. Um die Wärmekapazität eines Stoffes zu finden erwärmt man ihn, misst seine Temperatur und bringt ihn anschließend in einen Behälter mit einer bekannten Menge Wasser bekannter Temperatur und wartet das thermische Gleichgewicht ab. Aus der Mischungstemperatur kann die spezifische Wärmekapazität ermittelt werden. Es muss aber darauf geachtet werden, dass das Kalorimeter gut isoliert und keinen Wärmeaustausch mit der Umgebung zulässt.

$$\vartheta = \frac{c_1 \cdot m_1 \cdot \vartheta_1 + c_2 \cdot m_2 \cdot \vartheta_2}{c_1 \cdot m_1 + c_2 \cdot m_2}$$

Formel 2.5-5

ϑ …Mischungstemperatur

c_1, m_1, ϑ_1… Spez. Wärmekapazität, Masse und Temperatur des unbekannten Stoffes

c_2, m_2, ϑ_2 …Spez. Wärmekapazität, Masse und Temperatur des Bezugsstoffes (z.B. Wasser)

[16] Müller: Grundzüge der Thermodynamik, 2. Auflage; Springer; 1999; S. 77.

2.5.2 Ein nicht brennender Papierbecher

Material:

- ✓ Feuerzeug
- ✓ Papierbecher
- ✓ Wasser

Bild 24: Mit Wasser gefüllter Papierbecher über einer Flamme.

Aufbau und Durchführung:

Der Papierbecher wird mit Wasser gefüllt. Anschließend wird versucht, den befüllten Becher von unten mit dem Feuerzeug zu entzünden. Solange man es auch versucht, der Becher beginnt nicht zu brennen.

Erklärung:

Ist der Becher mit Wasser gefüllt, so ist die Innenseite des Bechers mit Wasser bedeckt, es entsteht eine gut wärmeleitende Verbindung zwischen den Materialien, was den Wärmeaustausch begünstigt. Im Vergleich zum luftgefüllten Becher kommen auf die erhitzte Fläche sehr viel mehr Teilchen, die die Wärmeenergie abziehen können. Diese Wassermoleküle steigen auf, kühleres Wasser strömt nach. Die Hülle wird von innen gekühlt. Die Temperatur der Hülle stellt sich so ein, dass ein Gleichgewicht zwischen von der Kerzenflamme zugeführter Energie pro Zeiteinheit und vom Wasser aufgenommener Energie pro Zeiteinheit entsteht und diese reicht für eine Entzündung des Bechers nicht aus. Weiters hat Wasser eine sehr hohe spezifische Wärmekapazität. Mit der Flamme kann nicht nur der Becher alleine erwärmt werden, sondern es muss auch das Wasser auf die Entzündungstemperatur des Bechers erwärmt werden. Der Großteil der Energie wird also dazu verwendet, um das Wasser zu erwärmen, weshalb der Becher länger über der Flamme

sein kann ohne zu brennen. Erst wenn das Wasser vollständig verdampft ist, kann die Flamme den Becher entzünden.

2.5.3 Feuerfester Luftballon

Material:

- ✓ 2 Luftballons
- ✓ 2 Kerzen

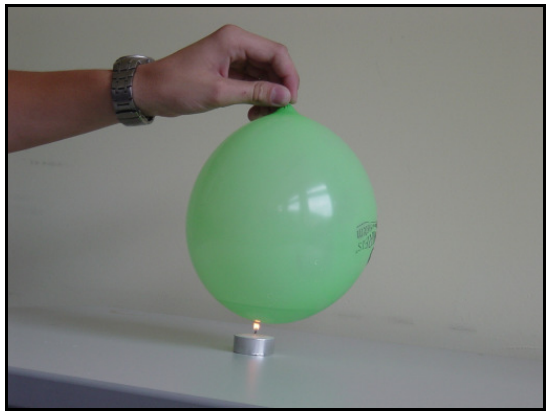

Bild 25: Mit Wasser gefüllter Luftballon über einer Kerze.

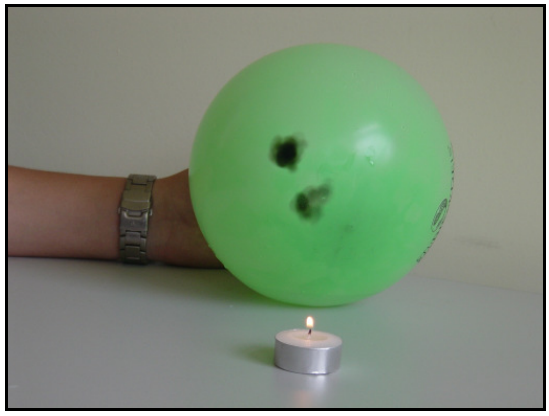

Bild 26: Russflecken auf dem Luftballon.

Aufbau und Durchführung:

In einen Luftballon wird etwas Wasser gefüllt. Dann werden beide gleichweit aufgeblasen und in gleicher Höhe aufgehängt. Die Kerzen werden angezündet und ca. 3 cm unter die Ballons gehalten. Einer zerplatzt, der andere nicht.

Erklärung:

Die Hülle der Ballons wird von unten erhitzt. Nun kommt es auf den Wärmeübergang zwischen Hülle und Luft bzw. Wasser an. Ist der Ballon nur mit Luft gefüllt, so werden nur wenige Luftteilchen an der Stelle, an der die Hüllentemperatur steigt, direkten Kontakt zum Ballon haben, da die enthaltene Luft ein Gasgemisch ist, welches relativ große Abstände zwischen den Molekülen aufweist. Die Luft kann also die Energie, die in Form von Wärme auf die Hülle übertragen wird, nicht schnell genug als innere Energie aufnehmen. Die Hüllentemperatur steigt bis der Ballon platzt.

Ist der Ballon mit Wasser gefüllt, so ist die Innenseite der Hülle mit Wasser bedeckt, es entsteht eine stark wärmeleitende Verbindung zwischen den Materialien, was den Wärmeaustausch begünstigt. Im Vergleich zum luftgefüllten Ballon kommen auf die erhitzte Fläche sehr viel mehr Teilchen, die die Wärmeenergie abziehen können. Diese Wassermoleküle steigen auf, kühleres Wasser strömt nach. Die Hülle wird von innen gekühlt. Die Temperatur der Hülle stellt sich so ein, dass ein Gleichgewicht zwischen von der Kerzenflamme zugeführte Energie pro Zeiteinheit und vom Wasser aufgenommene Energie pro Zeiteinheit entsteht und diese reicht für eine Zerstörung der Hülle nicht aus. Weiters hat Wasser eine sehr hohe spezifische Wärmekapazität. Mit der Flamme kann nicht nur die Hülle alleine erwärmt werden, sondern es muss auch das Wasser auf die, für den Ballon kritische Temperatur gebracht werden. Wegen der hohen Wärmekapazität braucht Wasser eine große Energiemenge um erwärmt zu werden.

2.5.4 Eine Kerze brennt unter Wasser

Material:

- ✓ Kerze
- ✓ Wanne
- ✓ Kaltes Wasser

Bild 27: Schacht in einer Kerze.

Aufbau und Durchführung:

Die Kerze wird in die Wanne gestellt und die Wanne bis zum oberen Ende der Kerze mit Wasser gefüllt. Die Oberseite und der Docht dürfen aber auf keinen Fall nass werden. Zündet man nun die Kerze an, so brennt die Flamme einen Schacht in die Kerze und brennt auch unter dem Wasserspiegel weiter.

Erklärung:

Die Erklärung für diesen Vorgang liegt in der spezifischen Wärmekapazität des Wassers. Normalerweise würde die Flamme das Kerzenwachs schmelzen und zur Verbrennung nutzen. Um es aber zum Schmelzen zu bringen, ist eine bestimmte Temperatur notwendig, die von der Flamme entnommen werden muss. Die Energie wandert also von der Flamme zu den Wachsschichten. Das Wachs am Rand wird aber von Wasser gekühlt und gibt die zugeführte Wärme ständig nach außen an das Wasser ab. Durch die hohe spezifische Wärme des Wassers erwärmt sich das Wasser nicht sehr schnell und damit schafft es das Wachs am Rand nicht die notwendige Temperatur zu erreichen um zu schmelzen. Das Wachs im Inneren erreicht diese Temperatur natürlich trotzdem und es kommt zur Schachtbildung.

2.6 Aggregatzustände und Phasenübergänge

2.6.1 Physikalischer Hintergrund

In der Natur kommen Stoffe in verschiedenen Phasen oder Aggregatzuständen vor. Welche Phase ein Stoff annimmt, hängt vom herrschenden Druck, dem verfügbaren Volumen und der Temperatur ab. Im täglichen Leben spielen vor allem die Zustände fest, flüssig und gasförmig eine Rolle (wenn man vom für die Erde wichtigen Plasma der Sonne absieht). Man kann auch diese Zustände in weitere Unterphasen einteilen, die hier nicht näher beschrieben werden. Eine mögliche Unterteilung zeigt das Diagramm, in dem jedoch das Bose- Einstein-Kondensat nicht verzeichnet ist, welches erst 1995 erzeugt werden konnte.

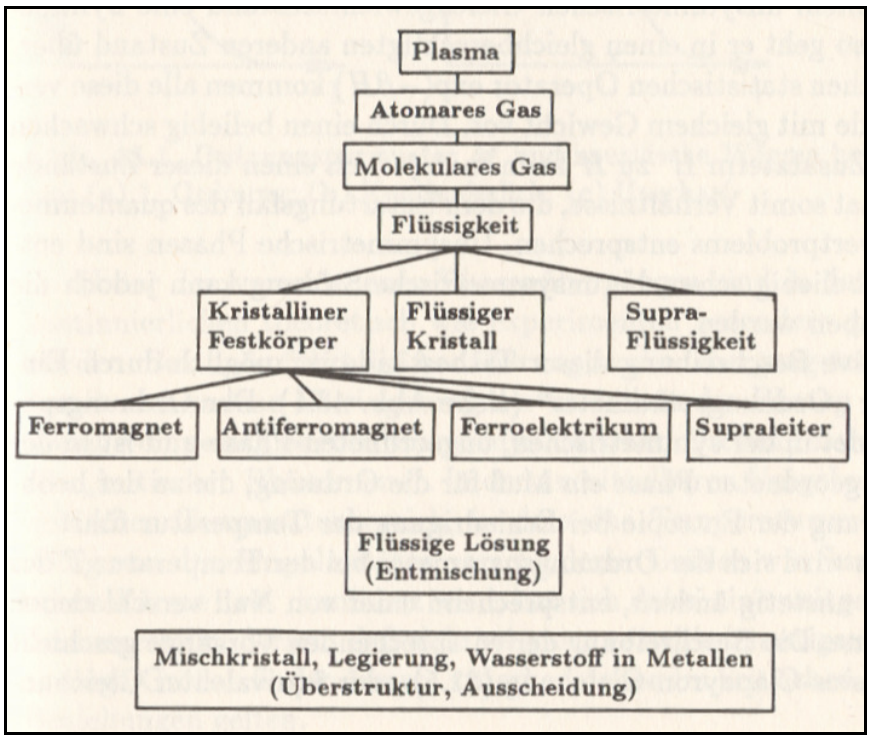

Bild 28: In der Natur vorkommende Phasen[17].

Bei Feststoffen weisen die Moleküle eine geordnete, dichte Struktur auf (Ausnahme: amorphe Stoffe). Auf ihren festen Gitterplätzen schwingen die Teilchen, je nach Temperatur um ihre Plätze. Bei Flüssigkeiten sind die Bindungen unter den Molekülen nicht mehr so stark, es herrscht keine feste Bindungsstruktur mehr, und die Teilchen können sich frei in der

[17] Brenig: Statistische Theorie der Wärme; 3. Auflage; Springer-Verlag; 1992; S. 251.

Flüssigkeit bewegen. In Gasen wiederum ist die thermische Bewegung der Teilchen so groß, dass sie nicht mehr aneinander haften.

Geht ein Stoff vom festen in den flüssigen Zustand über spricht man von Schmelzen, der umgekehrte Effekt wird Erstarren genannt, wobei bei Wasser und ähnlichen Flüssigkeiten auch Gefrieren verwendet wird. Die Verflüssigung von Gasen wird Kondensation genannt, der umgekehrte Vorgang Verdampfen oder Sieden. Verdampft ein Stoff, so gehen zuerst die schnelleren, und damit wärmeren Teilchen in den gasförmigen Zustand über. Diese warmen Teilchen fehlen damit in der zurückbleibenden Flüssigkeit, was eine Abkühlung mit sich bringt. Verdampfen ist also ein kühlender Vorgang, wenn gleichzeitig dem System keine Wärme zugeführt wird.

Es ist auch möglich, dass ein Feststoff direkt in den gasförmigen Zustand übergeht, was als Sublimation bezeichnet wird. Dies kommt etwa vor, wenn Schnee trotz tiefer Temperaturen verschwindet. Der Übergang von Gas zum Feststoff wird Resublimation genannt. Die folgende Grafik soll den Übergang von Feststoff zum Gas über den flüssigen Zustand unter konstanter Wärmezufuhr beschreiben.

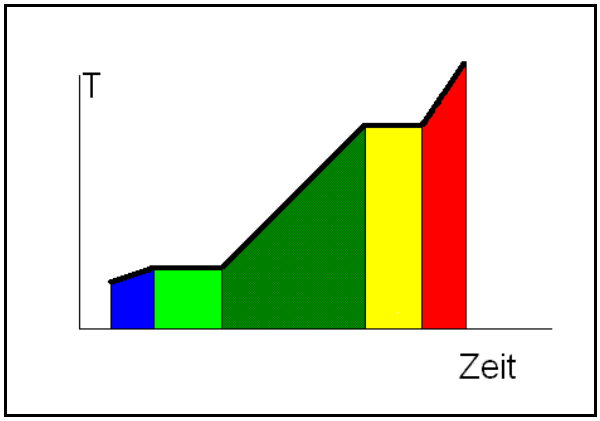

Bild 29: Änderung des Aggregatzustandes bei Zuführung eines konstanten Wärmestromes (schematische Darstellung)[18].

Nehmen wir an der Stoff liegt anfangs im festen Zustand vor. Eine konstante Wärmezufuhr würde den Stoff erwärmen, was mit den erhöhten thermischen Schwingungen der Gittermoleküle gedeutet werden kann (blau). Ab einer gewissen Temperatur beginnen die Gittermoleküle aus ihrem festen Plätzen auszubrechen und der Stoff beginnt zu schmelzen. Dabei erwärmt er sich nicht weiter, sondern die gesamte zugeführte Wärme wird zum Schmelzen des Stoffes verwendet (hellgrün). Die Wärmemenge, die notwenig ist, um 1 kg

[18] vgl. Dransfeld/Kienle/Kalvius: Physik I; 9. Auflage; Oldenburg Wissenschaftsverlag; 2001; S. 342.

eines bestimmten Stoffes zu schmelzen heißt Schmelzwärme oder Schmelzenthalpie. Dies ist auch jene Energiemenge, die beim Erstarren dem Stoff entzogen werden müsste. Ist der Stoff vollständig in den flüssigen Zustand übergegangen, so führt die Wärmezufuhr wieder zu einem linearen Anstieg der Temperatur. Die zugeführte Wärme wird von den Molekülen aufgenommen, was zu einer Erhöhung der kinetischen Energie führt. Wie steil die Gerade im T/t- Diagramm ist hängt dabei auch von der spezifischen Wärmekapazität des Stoffes ab (dunkelgrün). Ab einer gewissen Temperatur erwärmt sich die Flüssigkeit nicht mehr, sondern sie beginnt zu sieden. Die Moleküle haben eine kinetische Energie erreicht, die hoch genug ist, um die Anziehung der anderen Teilchen zu überwinden (gelb). Wie beim Schmelzen ist auch beim Sieden eine bestimmte, stoffabhängige Energiemenge notwendig, um ein kg eines Stoffes zum Verdampfen zu bringen, man spricht von der Verdampfungswärme oder der Verdampfungsenthalpie. Die Temperatur bei der eine Flüssigkeit zu verdampfen beginnt, hängt dabei auch vom Luftdruck über der Flüssigkeit ab. Die Teilchen der Luft üben Druck auf die Teilchen der Flüssigkeit aus, was sie daran hindert aus der Flüssigkeit auszubrechen. Auf hohen Berggipfeln ist der Luftdruck wesentlich kleiner als auf Meereshöhe, weshalb Flüssigkeiten auf Berggipfeln schon bei niedrigerer Temperatur sieden können als auf dem Meeresniveau. Ist die gesamte Flüssigkeit in den gasförmigen Zustand übergegangen, erwärmt sich das Gas durch die zugeführte Wärme. Das weitere Verhalten kann mit Hilfe der universellen Gasgleichung beschrieben werden. Welche Phase ein Stoff annimmt, kann in so genannten Phasendiagrammen abgelesen werden.

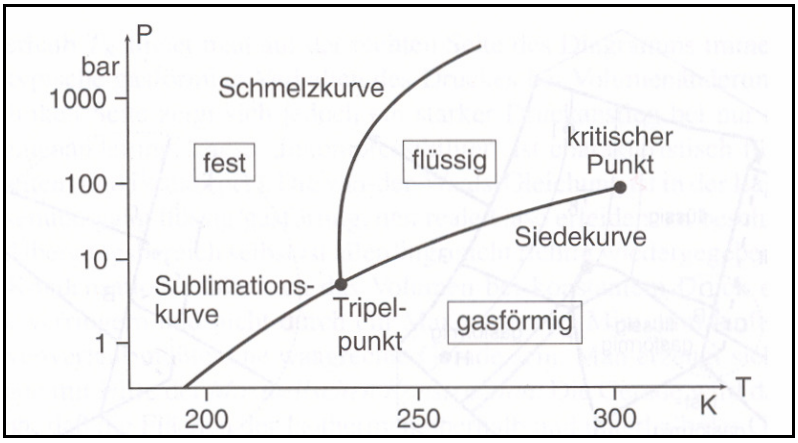

Bild 30: p-T Diagramm von Kohlendioxid[19].

[19] Dransfeld/Kienle/Kalvius: Physik I; 9. Auflage; Oldenburg Wissenschaftsverlag; 2001; S. 352.

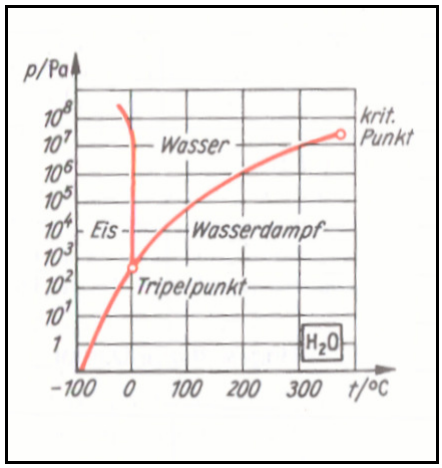

Bild 31: p-T Diagramm von Wasser.[20]

Während die meisten Stoffe ähnliche Phasendiagramme wie Kohlendioxid haben, unterscheidet sich das Phasendiagramm von Wasser im Bereich der Schmelzkurve deutlich davon. Die negative Steigung der Schmelzkurve deutet darauf hin, dass Eis bei Druckerhöhung zu schmelzen beginnt.

2.6.2 Verdunstungskälte

Material:

- ✓ Thermometer
- ✓ Watte
- ✓ Alkohol auf Raumtemperatur oder Spiritus

Bild 32: In Spiritus getauchte Watte am Sensor eines Thermometers.

[20] Kuchling: Taschenbuch der Physik; 17. Auflage; Carl Hanser Verlag; 2001; S. 266.

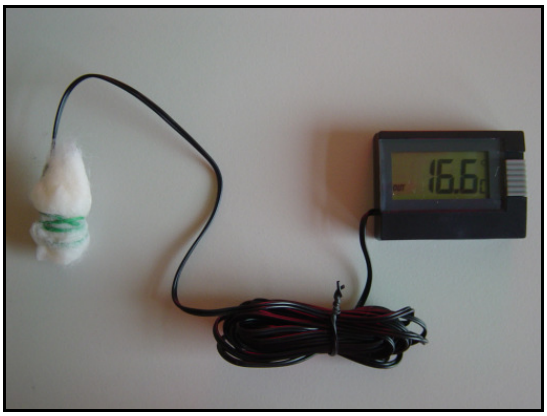

Bild 33: In Spiritus getauchte Watte am Sensor eines Thermometers nach 10 Minuten Wartezeit.

Aufbau und Durchführung:

An die Messstelle des Thermometers befestigt man den Wattebausch und misst die Temperatur. Dann wird die Watte mit Alkohol befeuchtet. Nach einiger Zeit sinkt die angezeigte Temperatur. Der Vorgang kann durch leichtes Schwenken und Blasen beschleunigt werden.

Erklärung:

Die Temperatur einer Flüssigkeit wird von der durchschnittlichen kinetischen Energie ihrer Moleküle bestimmt. Warme Flüssigkeiten bestehen aus Molekülen, die eine stärkere Bewegung aufweisen als kühlere, wobei aber wesentlich ist, dass durch etwaige äußere Einflüsse und statistische Schwankungen nicht alle Moleküle dieselbe kinetische Energie aufweisen. Beim Verdunsten brechen Moleküle nach und nach aus der Flüssigkeit aus, in dem sie die Anziehungskräfte der anderen Flüssigkeitsmoleküle überwinden. Um aber diese Kohäsionskräfte zu überwinden, brauchen sie ein gewisses Maß an Bewegungsenergie. Es können also immer die Teilchen mit höherer Energie zuerst aus der Flüssigkeit steigen, während jene Teilchen mit niedrigerer Energie vorläufig zurück bleiben. Die Flüssigkeit verliert also ihre „wärmeren“ Moleküle und kühlt ab. Die fehlende Wärme wird durch, aus der Umgebung und dem Thermometer kommender Wärme kompensiert, was den Temperaturabfall der Anzeige erklärt.

2.6.3 Eine Spritze als Wasserkocher

Material:

- ✓ Neue Einwegspritze (ca. 5 ml oder mehr)
- ✓ Heißes Wasser

Bild 34: Eine Spritze als Wasserkocher.

Aufbau und Durchführung:

In die Spritze wird heißes Wasser (min. 40ºC) ca. 2 - 3 cm hoch aufgezogen, dann dreht man die Spritze und presst eventuell eingeschlossene Luft wieder hinaus. Für den Versuch muss nun die Öffnung der Spritze dicht verschlossen gehalten werden. Dazu können die Finger verwendet werden, oder man verschließt die Spritze indem man den vordersten Teil kurz mit einer Flamme erwärmt und mit einer Zange zusammendrückt. Nun wird langsam aber kräftig an dem Kolben gezogen, und es kann eine Blasenbildung in der Flüssigkeit beobachtet werden. Nach einiger Zeit füllt sich eine kleine Kammer über dem Wasser mit einem Gas, das nur aus dem Wasser stammen kann und demnach aus Wasserdampf besteht. Lässt man den Kolben los, so wandert er wieder Richtung Flüssigkeit und der Wasserdampf verschwindet wieder.

Erklärung:

Eine Flüssigkeit beginnt zu sieden, falls der Sättigungsdampfdruck höher ist als der Umgebungsdruck. Der Sättigungsdampfdruck steigt mit steigender Temperatur der Flüssigkeit stetig an. Demnach hat man zwei Möglichkeiten eine Flüssigkeit zum Sieden zu bringen. Entweder man erhöht die Temperatur der Flüssigkeit, diese Möglichkeit macht man sich für gewöhnlich beim Kochen zu nutze oder man senkt den Umgebungsdruck, was hier in diesem Experiment passiert ist. Beim Ziehen am Kolben erhöht man das Volumen über der Flüssigkeit. Nach der universellen Gasgleichung sinkt mit steigendem Volumen eines Gases der Druck im Gas, welcher wiederum den Umgebungsdruck der Flüssigkeit ausmacht. Die Moleküle der Flüssigkeit können also leichter aus der Flüssigkeit ausbrechen, die Flüssigkeit siedet.

2.6.4 Wann verdampfen Flüssigkeiten

Dieser Versuch besteht aus mehreren Phasen und zeigt die Abhängigkeit der Verdampfungsgeschwindigkeit von der Stoffart, der Zugluft, der Temperatur und der Oberfläche.

Material:

- ✓ Wasser
- ✓ Spiritus
- ✓ 2 kleine Schalen
- ✓ 1 große Schale
- ✓ 2 Rundfilter oder Kaffeefilter
- ✓ Föhn (wenn möglich mit Kaltlufteinstellung)
- ✓ Stehlampe

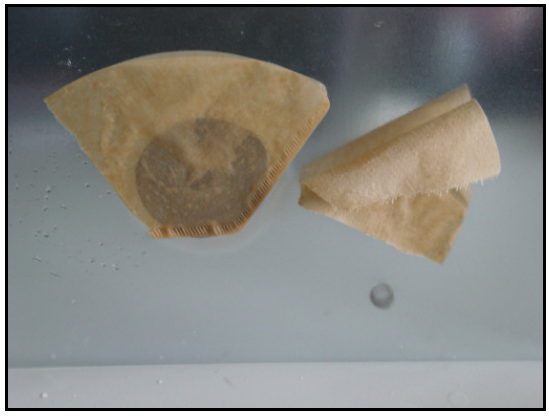

Bild 35: Unterschiedliche Verdunstungsgeschwindigkeit von Wasser (links) und Spiritus (rechts).

Phase 1: Aufbau und Durchführung:

Ein Rundfilter (bzw. Kaffeefilter) wird mit Wasser, der andere mit Spiritus befeuchtet und an eine glatte Wand geheftet. Durch die feuchte Oberfläche werden beide Filter von alleine an der Wand haften bleiben. Der Rundfilter mit dem Spiritus fällt aber schneller wieder von der Wand als der mit Wasser befeuchtete.

Phase 1: Erklärung:

Nicht jeder Stoff verdampft gleich schnell. Im Vergleich zu Spiritus braucht Wasser eine sehr lange Zeit um zu verdampfen. Da aber die beiden Flüssigkeiten in diesem Versuch den Klebstoff zwischen Filter und Wand darstellen, fehlt beim Spiritusfilter der Klebstoff früher, aus diesem Grund fällt er schneller von der Wand. Um bei den folgenden Phasen bessere Ergebnisse zu haben, wird Spiritus anstatt Wasser verwendet, es ist aber bei etwas mehr Geduld auch mit Wasser möglich, die gewünschten Effekte sichtbar zu machen.

Phase 2: Aufbau und Durchführung:

In die große und in eine kleine Schale gibt man die gleiche Menge an Spiritus. Dabei soll der Boden der großen Schale auf jeden Fall vollständig bedeckt sein. Nach einiger Zeit wird man merken, dass der Spiritus in der großen Schale schneller verdampft als in der kleinen. Um den Effekt zu beschleunigen, kann man beide Schalen mit einer Lampe bestrahlen.

Phase 2: Erklärung:

Beim Verdunsten treten Teilchen der Flüssigkeit in die Luft über ihr über. Dies ist, bedingt durch die Wände der Schalen nur an der Oberfläche möglich. Die große Schale bietet aber eine wesentlich größere Oberfläche an, was erklärt, warum die Flüssigkeit dort schneller verdampft.

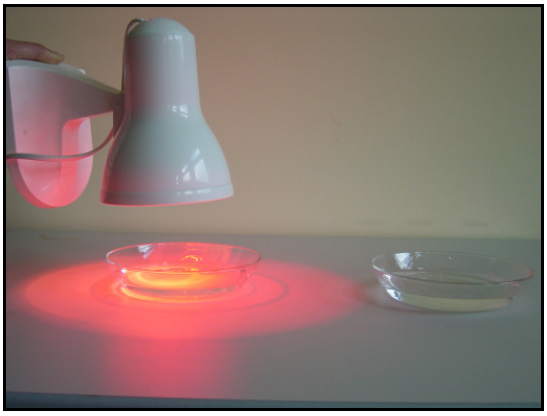

Bild 36: Unterschiedliche Verdunstungsgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Temperatur.

Phase 3: Aufbau und Durchführung:

Die beiden kleinen Schalen werden mit der gleichen Menge an Spiritus gefüllt. Eine Schale wird unter die Lampe gestellt, die andere nicht. Schon bald sieht man, dass der Spiritus unter der Lampe schneller verdampft.

Phase 3: Erklärung:

Durch die Lampe über der Flüssigkeit wird die Temperatur in der Flüssigkeit erhöht. Eine Temperaturerhöhung bedeutet ein Anwachsen der kinetischen Energie der Moleküle. Haben diese Moleküle genug Energie, um die Anziehungskräfte innerhalb der Flüssigkeit zu überwinden, so können sie aus der Flüssigkeit ausbrechen und in den gasförmigen Zustand übergehen.

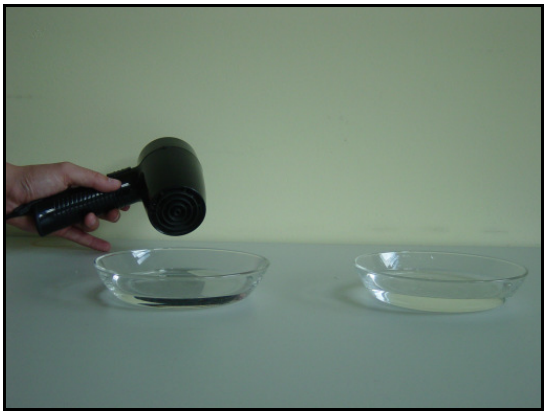

Bild 37: Unterschiedliche Verdunstungsgeschwindigkeit bei Einwirkung einer Luftströmung.

Phase 4: Aufbau und Durchführung:

Die beiden kleinen Schalen werden mit der gleichen Menge an Spiritus gefüllt. Über eine Schale soll der Föhn ständig kalte Luft blasen. Man kann beobachten, dass der Spiritus in jener Schale, über die der Föhn bläst, schneller verdunstet als bei der anderen.

Phase 4: Erklärung:

Das Verdampfen einer Flüssigkeit ist kein einseitiger Prozess. Es treten nicht nur Teilchen aus der Flüssigkeit aus, indem sie verdampfen, sondern es kommt auch immer zu einer Kondensation bereits verdampfter Moleküle zurück in die Flüssigkeit. Durch das Gebläse des Föhns wird die Luft über der Flüssigkeit aber gleich abtransportiert. Damit haben aber die bereits verdampften Moleküle keine Möglichkeit wieder in die Flüssigkeit zurück zu kondensieren, was bei der Schale ohne den Föhn nach wie vor möglich ist. Durch den Luftstrom ist es auch möglich, dass Teilchen der strömenden Luft auf die Oberfläche der Flüssigkeit treffen und einen Teil ihrer kinetischen Energie auf Teilchen der Flüssigkeit übertragen. Die Energieeinkopplung kann also ein herausboxen einiger Teilchen der Flüssigkeit bedeuten.

2.6.5 Siedepunkt von Fett

Dieser Versuch bringt ein sehr hohes Gefahrenpotential mit sich und sollte auf keinen Fall Kindern oder anderen unkundigen Personen zur Durchführung überlassen werden. Wasser im Kontakt mit kochendem Fett kann zu gefährlichen Explosionen führen, weshalb brennendes Fett niemals mit Wasser gelöscht werden darf. Schon die paar Wassertropfen, dieses Experimentes, können leichte Verbrennungen an der Haut hervorrufen. Lange Ärmel und eine Schutzbrille sollten auf jeden Fall verwendet werden.

Material:

- ✓ Herd
- ✓ Bratpfanne
- ✓ Speiseöl
- ✓ Wasser
- ✓ Deckel der Pfanne

Aufbau und Durchführung:

In der Pfanne wird Öl erhitzt. Dabei sollte das Öl den Boden der Pfanne gerade bedecken. Nun gibt man einen Tropfen Wasser in das Öl. Es sollte dabei nicht mehr Wasser verwendet werden, da sonst erhöhte Verbrennungsgefahr besteht. Sobald das Wasser auf das Fett trifft, wird es wieder unter lautem Zischen aus der Pfanne geschleudert. Der Deckel dient in diesem Versuch nur als Schutz, sollte das Fett zu brennen beginnen.

Erklärung:

Fett hat einen Siedepunkt von über 250°C. Trifft nun ein Wasserteilchen auf die Fettschicht, so erhöht sich seine Temperatur sofort und es verdampft augenblicklich. Die entweichenden Wasserdampfmoleküle reißen kleine Fettteilchen mit sich, die man bei Unachtsamkeit auch auf der Haut spüren kann.

2.6.6 Wasserdampf kondensiert

Material:

- ✓ Plastikflasche
- ✓ Eiswürfel
- ✓ Topf
- ✓ Sehr heißes Wasser
- ✓ Kaltes Wasser

Aufbau und Durchführung:

Zuerst macht man eine Öffnung in die Flasche, die groß genug ist, dass die Flasche mit Eiswürfeln gefüllt werden kann. Die Räume zwischen den Eiswürfeln werden mit kaltem Wasser gefüllt. Hält man nun die Eiswasserflasche über den Topf mit heißem Wasser, so kondensiert der Wasserdampf des heißen Wassers an der Flasche, und man kann das kondensierte Wasser an der Flasche sehen.

Erklärung:

Der Wasserdampf steigt auf und kommt in Kontakt mit der gekühlten Flasche. Da die Flasche sicherlich eine Temperatur unter dem Taupunkt von Wasser hat, geht der Wasserdampf an der Flasche vom gasförmigen in den flüssigen Zustand über. Das Resultat sind die Wassertropfen auf der Unterseite der Flasche.

2.6.7 Sieden durch Kondensation

Material:

- ✓ Glaskolben mit Verschluss
- ✓ Heißes Wasser
- ✓ Brenner
- ✓ Kaltes Wasser aus der Leitung

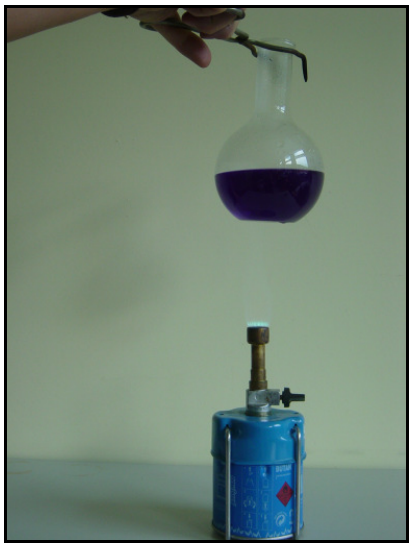

Bild 38: Erwärmung von Wasser in einem Kolben.

Aufbau und Durchführung:

Man erhitzt das heiße Wasser im Kolben bis es siedet. Dann stellt man die Wärmezufuhr ab, verschließt den Kolben mit dem Verschluss und dreht den Kolben um. Im Kolben befindet sich nun oberhalb der Flüssigkeit ein Gasgemisch, welches zu einem guten Teil aus Wasserdampf besteht. Lässt man nun kaltes Wasser über den Kolben laufen, so beginnt die eingeschlossene Flüssigkeit wieder zu sieden.

Erklärung:

Beim Verdampfen im Kolben bildet sich über der Flüssigkeit eine Schicht aus Luft und viel Wasserdampf, die durch den Verschluss im Kolben eingeschlossen wird. Durch die Abkühlung mit kaltem Wasser kondensiert der Wasserdampf, was ein Sinken des Dampfdrucks mit sich bringt. Das Wasser kühlt nicht so schnell ab wie das Gasgemisch über der Flüssigkeit, der Sättigungsdampfdruck bleibt also annähernd gleich. Fällt der Dampfdruck unter den Sättigungsdampfdruck, so können auch bei niedrigerer Temperatur Teilchen aus der Flüssigkeit ausbrechen und das Wasser beginnt zu sieden.

2.6.8 Schmelzwärme

Material:

- ✓ Wärmepad

Bild 39: Wärmepad beim Erstarren.

Aufbau und Durchführung:

Ein Wärmepad, wie es das Bild zeigt, bekommt man in Sportartikelgeschäften zu kaufen. Der Inhalt des Plastikbeutels ist anfangs mit einer Flüssigkeit gefüllt. Knickt man das kleine Metallblättchen, das in der Flüssigkeit schwimmt, so beginnt sich die Flüssigkeit um die Knickstelle zu erhärten, bis der gesamte Beutel erstarrt ist. Der Beutel erwärmt sich, und gibt Wärme an die Umgebung ab. Der ursprüngliche Zustand kann wieder hergestellt werden, indem man den Beutel für ein paar Minuten in heißes Wasser legt.

Erklärung:

Wärmepads sind ein Beispiel für unterkühlte Schmelzen. Das Gel im Beutel besteht aus Natriumacetat-Trihydrat und ist zunächst flüssig. Durch das Knicken des Metallplättchens entsteht ein Kristallisationskeim, von dem aus die gesamte Flüssigkeit wieder erstarren kann. Die Wärmeentwicklung kann über den Schmelzvorgang des erstarrten Beutels erklärt werden. Legt man den Beutel in kochendes Wasser, so schmilzt der kristallisierte Beutelinhalt und geht in den flüssigen Zustand über. Die Wärme, die für das Schmelzen nötig ist, kann aber nicht einfach verloren gehen, sondern bleibt im System gespeichert. Erstarrt das Gel, so wird genau diese Wärme, die so genannte Schmelzenthalpie (Schmelzwärme), wieder frei und an die Umgebung abgegeben.

2.7 Wärmeleitung

2.7.1 Physikalischer Hintergrund

Neben Konvektion und Wärmestrahlung ist Wärmeleitung die dritte Möglichkeit der Wärmeübertragung. Der Wärmetransport erfolgt hier durch Wechselwirkung von Atomen oder Molekülen, die auf ihren Plätzen hin und her Schwingen. Die Teilchen selbst bewegen sich dabei nicht fort. Die Energie wird also rein durch Stöße mit den benachbarten Teilchen übertragen, was einem Austausch von kinetischer Energie gleichkommt. Reine Wärmeleitung kann demnach nur in Festkörpern vorkommen, da sich die Moleküle in einem Festkörper nicht bewegen können. Metalle haben gegenüber anderen Festkörpern eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit. Neben den Molekülschwingungen wird das Leitvermögen durch die freien Elektronenströme erhöht. Die freien Elektronen erhöhen ihre kinetische Energie beim Stoß mit einem Atom, indem sie Teile dessen thermischer Energie aufnehmen und durch Stöße mit anderen Atomen wieder abgeben. Das Maß für die Fähigkeit Wärme zu leiten ist die Wärmeleitfähigkeit λ. Sie ist eine temperaturabhängige Größe mit der Dimension W/(m·K). Für 20ºC beträgt λ näherungsweise:

$$\lambda_{20^\circ\mathrm{C}} \approx \frac{2{,}45 \cdot \chi \cdot T}{10^8}$$

Formel 2.7-1

T… die absolute Temperatur; χ… elektrische Leitfähigkeit (1/ (Ω·m)).

Damit liegt λ für Metalle in der Größenordnung 10 bis 500.

Aluminium	237
Blei	353
Kupfer	401
Stahl	46
Beton	0,19 - 1,3
Eichenholz	0,15

Tabelle 3: Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern[21]

[21] Tipler: Physik, 1. Auflage; Spektrum Lehrbuch; 1994; S. 547.
Wagner: Wärmeübertragung; 3. Auflage; Vogl Fachbuch; 1991 S. 16.

Da sich die Moleküle in Gasen und Flüssigkeiten wesentlich freier bewegen können als in Festkörpern, ist auch die Wärmeleitfähigkeit dieser Stoffe wesentlich geringer. So liegt λ in Gasen bei der Größenordnung von nur 0,01 – 0,025 W/(m·K). Flüssigkeiten haben ein λ im Bereich 0,1 – 0,6 W/(m·K), Salzschmelzen ein λ im Bereich 1 – 4 W/(m·K) und Metallschmelzen eine Wärmeleitfähigkeit von 10 bis 100 W/(m·K).

Hat man einen Festkörper dessen Enden unterschiedliche Temperaturen aufweisen, so entsteht durch Wärmeleitung ein Wärmestrom I. Dieser fließt gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik immer in Richtung kälterem Ende. Der Wärmestrom ergibt sich aus:

$$I = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot \Delta T$$

Formel 2.7-2

(δ… Abstand der beiden Enden; A… Querschnittfläche; ΔT... Temperaturdifferenz).

2.7.2 Wärmeleitung auf Metallplatten

Material:

- ✓ Metallplatte (oder auch verschiedene Platten aus Kupfer, Stahl, Aluminium)
- ✓ Zündhölzer
- ✓ Brenner

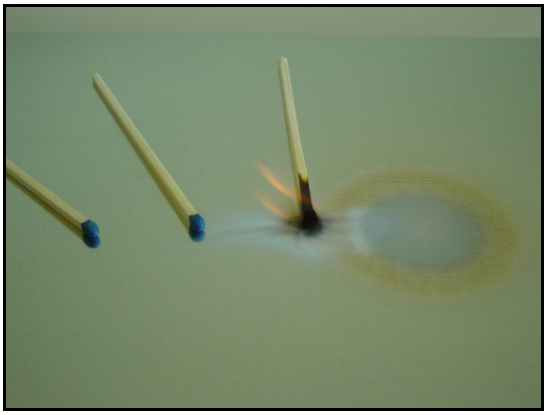

Bild 40: Wärmeleitung auf einer Metallplatte.

Aufbau und Durchführung:

Auf das Blech werden in unterschiedlichen Abständen Zündhölzer gelegt. Die Wärmequelle wird unter die Platte gehalten. Mit der Zeit entzünden sich nach und nach die Streichhölzer auf der Platte. Verwendet man Platten aus unterschiedlichen Materialien, so sieht man die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit.

Erklärung:

Durch Wärmeleitung wird die Wärme in der Platte zu den Zündhölzern geleitet. Erreicht die Platte unter den Streichhölzern die Entzündungstemperatur, so beginnen diese zu brennen. Beim Vergleich von verschieden Platten muss auf die unterschiedliche Dicke der Platten geachtet werden.

2.7.3 Wärmeleitung in Draht mit Wachskügelchen

Dieser Versuch besteht aus mehreren Phasen und zeigt die Abhängigkeit der Wärmeleitung von den Größen: Länge, Material und Drahtdicke (Querschnitt).

Material:

- ✓ Kerze
- ✓ Drähte verschiedener Sorten
- ✓ Kerzenwachs (aus Kerzen oder Bastelmaterial)
- ✓ Unterlage
- ✓ Zange oder Klammer zum Halten

Bild 41: Wärmeleitung auf einem mit Wachskügelchen bestückten Draht.

Phase 1: Aufbau und Durchführung

Auf einen Draht werden in regelmäßigen Abständen kleine Wachskügelchen mit annähernd derselben Größe gehängt. Mit der Klammer wird der Draht nun mit der Spitze waagrecht knapp über die Flamme gehalten. Die Wachskügelchen fallen nach einiger Zeit vom Draht ab, wobei jenes Kügelchen, das der Flamme am nächsten ist, als erstes abfällt.

Phase 1: Erklärung:

Durch Wärmeleitung wird Wärme von der Flamme durch den Draht geführt. Der Wärmestrom ist aber größer, je kleiner der Abstand zur Flamme ist. Deshalb fallen jene Wachskügelchen, die nahe am heißen Ende sind, schneller ab.

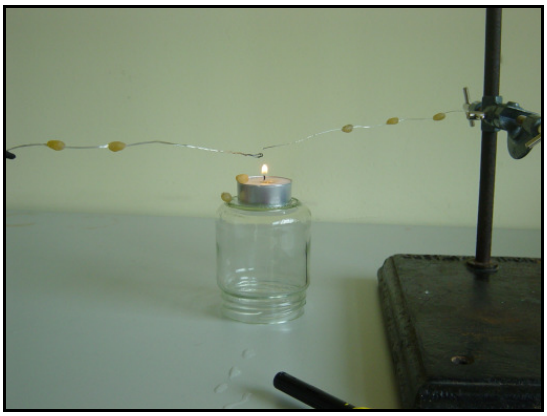

Bild 42: Wärmeleitung auf Drähten aus gleichem Material. Der Draht links hat aber den dreifachen Durchmesser.

Phase 2: Aufbau und Durchführung:

Man nimmt vier Drähte derselben Länge und derselben Sorte. Drei dieser Drähte hält man nebeneinander und verdreht sie, sodass ein dreimal so dicker Draht entsteht. Sowohl auf den einfachen, als auch auf den dreifachen Draht werden nun in denselben Abständen Drahtkügelchen geklebt (ca. alle 2 cm). Nun werden beide Drähte waagrecht über die Flamme gehalten. Man beobachtet, dass die Wachskügelchen auf dem dickeren Draht schneller abfallen als auf dem dünneren.

Phase 2: Erklärung

Durch den größeren Querschnitt des dreifachen Drahtes kann mehr Wärme im selben Zeitraum durch den Draht transportiert werden als durch den einfachen. Der Wärmefluss hängt also direkt von der Querschnittfläche des Leiters ab.

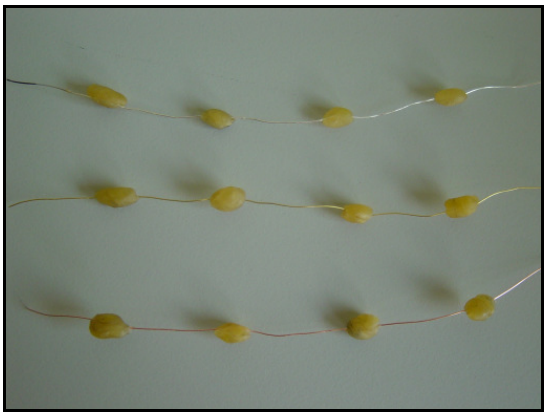

Bild 43: Drähte mit Wachskügelchen bestückt. Silberdraht (oben), Messingdraht (mitte) und Kupferdraht (unten).

Phase 3: Aufbau und Durchführung

Zwei gleich lange Drähte aus unterschiedlichem Material aber derselben Länge und derselben Dicke (wenn notwenig, kann durch Falten die unterschiedliche Dicke ausgeglichen werden) werden wie oben alle 2 cm mit Wachskügelchen versehen. Hält man nun beide Drähte waagrecht über die Flamme, so fallen die Kügelchen von den beiden Drähten unterschiedlich schnell ab.

Phase 3: Erklärung

Die Materialkonstante λ beschreibt die Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Materialien. Jedes Material hat seine eigene Wärmeleitfähigkeit. Jener Draht mit der größeren Wärmeleitfähigkeit wird also seine Wachskügelchen schneller verlieren als der mit dem niedrigerem λ. Zu beachten ist hier, dass beide Drähte annähernd gleich dick sind, da sonst auch der Querschnitt eine Rolle spielt.

2.7.4 Keine Brandlöcher im Taschentuch

Material:

- ✓ 2 Taschentücher
- ✓ Zigarette
- ✓ Münze

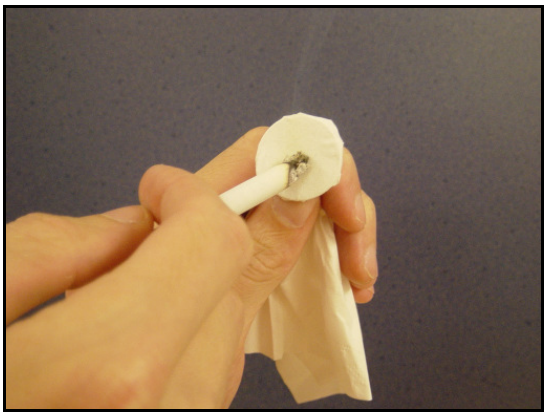

Bild 44: Wärmeleitung einer Münze in einem Taschentuch.

Aufbau und Durchführung:

Zuerst hält man die brennende Zigarette und berührt damit das erste Taschentuch. Die Zigarette brennt ein Loch in das Taschentuch. Anschließend wickelt man die Münze in das Taschentuch und drückt nun die Zigarette gegen die Münze auf das Taschentuch. Es wird nun kein Loch in das Taschentuch gebrannt.

Erklärung:

Da Metalle gute Wärmeleiter sind, wird die Wärme der Zigarette schnell von der Oberfläche der Münze in die Münze abgeführt. Der Berührungspunkt der Zigarette mit dem Taschentuch wird deshalb nie so heiß, dass es zur Entzündung kommen kann. Beim ersten Taschentuch hingegen wird die Wärme nicht abgeführt, und es entsteht relativ bald das Brandloch.

2.7.5 Schlechte Wärmeleitung von Wasser

Material:

- ✓ Reagenzglas
- ✓ Eiswürfel
- ✓ Wasser
- ✓ Draht
- ✓ Brenner, Kerze

Aufbau und Durchführung:

Der Draht wird um den Eiswürfel gebunden. So belastet wird der Eiswürfel in ein fast ganz mit kaltem Wasser gefülltes Reagenzglas gelegt. Der Eiswürfel muss schwer genug sein, dass

er sinkt. Das obere Ende des Reagenzglases wird in den Brenner gehalten, bis das Wasser siedet. Das Eis am unteren Ende schmilzt nicht, das Reagenzglas ist am unteren Ende immer noch kühl.

Variante:

Eine einfachere Möglichkeit einen Eiswürfel zu beschweren besteht darin, schon vor dem gefrieren in die Eiswürfelform kleinere Nägel zu geben. Der Eiswürfel schließt dann die Nägel ein und die Gesamtdichte ist größer als die von Wasser.

Erklärung:

Normalerweise würde die gesamte zugeführte Wärme zuerst zum Schmelzen des Eiswürfels verwendet werden, ehe das Wasser zu kochen beginnt. Weil aber das Glas am oberen Ende erhitzt wird und Wasser selbst sehr schlecht Wärme leitet, bleibt das untere Ende des Reagenzglases weiterhin kühl. Die Wärmeleitfähigkeit von Wasser beträgt bei 27ºC nur 0,609 W/(m·K).

2.7.6 Das sonderbare Verhalten von Flammen unter einem Drahtnetz

Material:

- ✓ Kerze
- ✓ Sieb, Drahtnetz

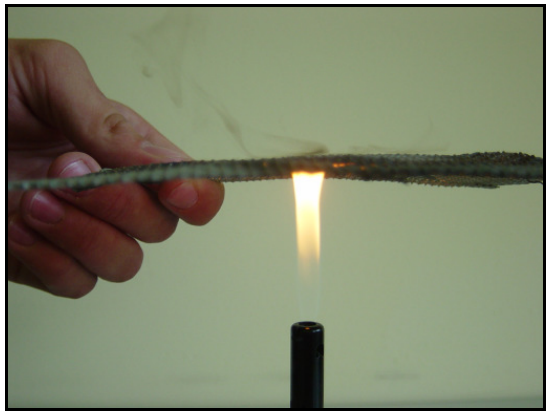

Bild 45: Eine Flamme unter einem Drahtnetz.

Aufbau und Durchführung:

Man hält das Sieb über die brennende Kerze. Man sieht, dass die Flamme nur bis an das Drahtnetz reicht, aber nicht darüber hinaus.

Erklärung:

Die gute Wärmeleitung von Metall sorgt dafür, dass die Wärme schnell von der Flamme weggeleitet wird und nicht an die Oberseite gelangt. So kann sich die Luft oberhalb des Drahtnetzes nicht erwärmen und die Flamme kann nicht durchschlagen.

2.8 Konvektion

2.8.1 Physikalischer Hintergrund

Konvektion beziehungsweise Wärmeströmung ist neben Wärmeleitung und Wärmestrahlung eine weitere Möglichkeit, um Wärme zu übertragen. Das Wort Konvektion entstammt dem lateinischen convehi, was so viel wie mittragen und mitnehmen bedeutet, dies beschreibt die Art des Wärmetransports mittels Konvektion sehr gut. Warme Teilchen, also Moleküle oder Atome, bewegen sich durch den Raum, und nehmen so die Wärme mit sich. Es handelt sich also um einen Wärmetransport, der auf Stofftransport basiert. Damit ist auch klar, dass die Teilchen des transportierenden Mediums nicht fest in einer Struktur verbunden sein dürfen. Somit ist Konvektion in Festkörpern nicht möglich, sehr wohl aber in Gasen und Flüssigkeiten, die gesammelt als Fluide bezeichnet werden. Diese Strömungen können entweder durch Pumpen erzwungen werden, oder sie entstehen durch Konzentrations- und Dichteunterschiede in einem Fluid. Diese Strömungen werden dann als freie Strömungen bezeichnet und spielen beispielsweise in der Metrologie eine große Rolle.

2.8.2 Funktionsweise eines Doppelfensters

1. Variante:

<u>Material:</u>

- ✓ 2 kleinere Marmeladegläser
- ✓ 1 größeres Marmeladeglas, in das eines der kleineren Gläser passt
- ✓ etwas Butter
- ✓ Heißes Wasser

<u>Aufbau und Durchführung:</u>

Eines der kleineren Gläser wird in das größere Glas gestellt. Nun wird an die äußeren Gläser ein festes Stück Butter geheftet. Gießt man sehr heißes Wasser zuerst in das Doppelglas und dann in das Einfachglas, so beginnt die Butter am Einfachglas schneller zu schmelzen und rutscht schneller nach unten als beim Doppelglas.

2 Variante:

Material:

- ✓ 3 gleiche Marmeladegläser
- ✓ 6 kleine Scheiben aus Glas
- ✓ etwas Butter
- ✓ 12 kleine und gleichartige Gummistücke
- ✓ heißes Wasser

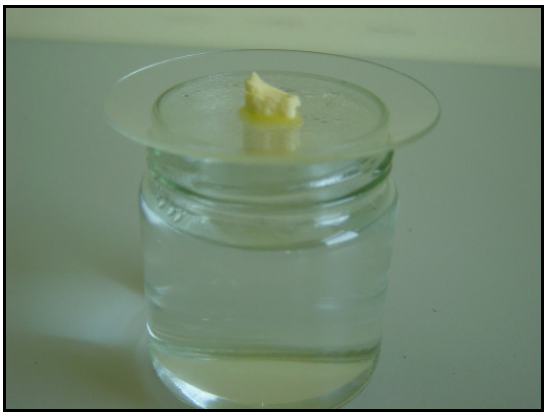

Bild 46: Bauweise eines Einfachfensters.

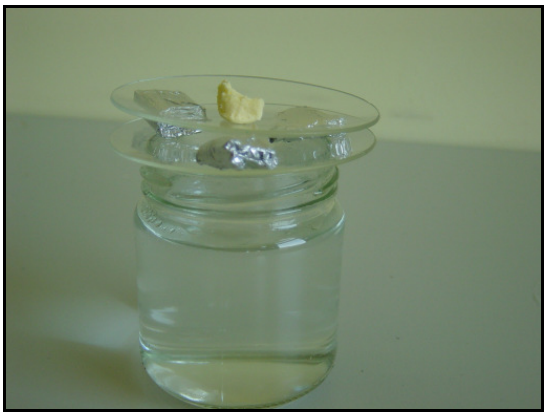

Bild 47: Bauweise eines Doppelfensters.

Aufbau und Durchführung:

Die Gummistücke können etwa aus einem Gummischlauch hergestellt werden. Aus den Gummistücken und 5 Glasscheiben werden nun ein Doppelfenster und ein Dreifachfenster hergestellt. Die Gummistücke werden dazu verwendet, den Leerraum zwischen den Scheiben zu erzeugen. Auf die oberste Glasscheibe der beiden gebastelten Fenster wird ein Stück Butter gegeben, ebenso auf die letzte übrige Glasscheibe, die als Einfachfenster verwendet wird. Anschließend werden alle drei Gläser zu ca. ¾ mit heißem Wasser gefüllt und schnell mit dem Einfach-, dem Doppel- und dem Dreifachfenster verschlossen. Die Butter auf dem

Einfachfenster beginnt schneller zu schmelzen als am Doppelfenster bzw. als am Dreifachfenster.

Erklärung:

In beiden Varianten befindet sich zwischen dem Glas Luft. Luft ist, wie jedes Gas ein schlechter Wärmeleiter. Der Wärmetransport ist also nur mittels Konvektion möglich. Der Raum zwischen den Glasflächen ist aber sehr eng, so dass die Luft in diesem Raum nicht zu strömen beginnt. Es kommt also nur sehr langsam zum Wärmetransport mittels Konvektion, was die isolierende Wirkung eines Doppelglases ausmacht.

2.8.3 Kamin

Material:

- ✓ 2 leere WC-Papierrollen
- ✓ Schuhkarton mit Deckel
- ✓ Teelicht
- ✓ Feuerzeug
- ✓ Schere
- ✓ Papier
- ✓ Bleistift

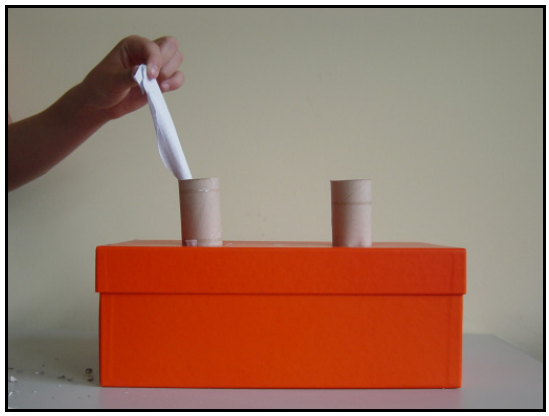

Bild 48: Schachtelkamin.

Aufbau und Durchführung:

Mit dem Bleistift zeichnet man zwei Kreise in Größe der Papierrollen auf den Deckel der Schachtel, schneidet diese aus und steckt die Rollen in den Deckel. Das Teelicht wird

angezündet und so in die Schachtel gestellt, dass es sich genau unter einem der beiden Kamine befindet. Nun rollt man das Blatt Papier eng zusammen, zündet es an und bläst das Feuer nach wenigen Augenblicken wieder aus. Das rauchende Papier hält man dann in den Kamin, unter dem sich keine Kerze befindet. Der Rauch wird durch den Kamin gezogen und steigt durch den zweiten Kamin wieder auf.

Erklärung:

Die Kerzenflamme erwärmt die Luft über der Kerze. Die Luft dehnt sich aus, hat eine geringere Dichte und beginnt aufzusteigen und die Schachtel durch den Kamin über der Flamme zu verlassen. Es kommt zur Konvektion, weil der frei werdende Raum in der Schachtel durch nachströmende Luft durch den zweiten Kamin gefüllt wird.

2.8.4 Flaschenvulkan

Material:

- ✓ Große Wanne aus Glas oder transparentem Kunststoff
- ✓ 2 Glasflaschen mit Verschluss
- ✓ 2 Sorten verschiedenfarbiger Tinte
- ✓ Eiswürfel
- ✓ Heißes Wasser
- ✓ Lauwarmes Wasser
- ✓ Kaltes Wasser

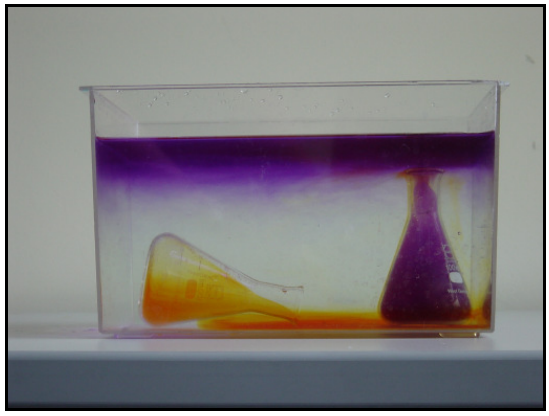

Bild 49: Flaschenvulkan mit warmem Wasser (violett) und kaltem Wasser (orange).

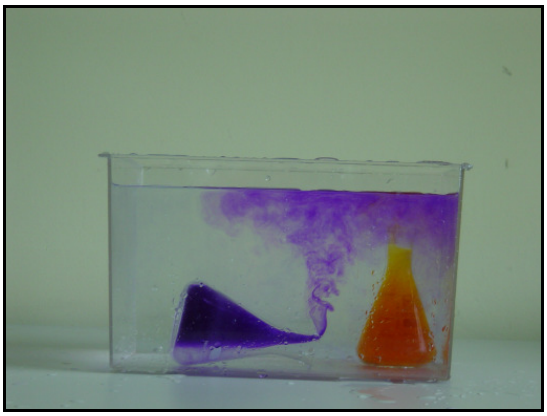

Bild 50: Flaschenvulkan mit warmem Wasser (violett) und kaltem Wasser (orange).

Aufbau und Durchführung:

In einer der beiden Flaschen wird mit dem kaltem Wasser, den Eiswürfeln und einer mit Tinte gefärbtes Eiswasser hergestellt. In der anderen Flasche wird heißes Wasser mit der zweiten Farbe eingefärbt. Die Wanne wird mit lauwarmem Wasser gefüllt. Die Eiswürfel werden entfernt, und die Flasche mit kaltem Wasser wird vorsichtig in die gefüllte Wanne gelegt. Die Warmwasserflasche wird vorsichtig in die Wanne gestellt. Um Verwirbelungen zu vermeiden, kann man beim Einstellen der Flaschen auch die Verschlüsse verwenden, die erst unter Wasser entfernt werden. Das kalte Wasser strömt langsam aus der Flasche und füllt den Boden der Wanne, das warme Wasser hingegen strömt aus der Flasche und sammelt sich an der Oberfläche der an. Wartet man etwas, kann man auch beobachten, wie sich das kalte Wasser an der warmen Flasche erwärmt und nach oben steigt. Anschließend wiederholt man den Versuch mit vertauschten Flaschen, also die warme Flasche liegt am Wannenboden und die kalte Flasche steht in der Wanne. Man sieht schnell wie sich die gefärbten Flüssigkeiten zu vermischen beginnen.

Erklärung:

Warmes Wasser hat eine geringere Dichte als kaltes Wasser. Deshalb sammelt sich das warme Wasser an der Wasseroberfläche, während das kältere Wasser unten bleibt. Die warme Flasche in der Wanne wirkt aber wie eine kleine Heizung auf das kalte Wasser. Das kalte Wasser erwärmt sich und steigt an der Flaschenwand nach oben.

Vertauscht man die Flaschen, so strömt das warme Wasser nach oben. Mit dem Wasser wird auch die Wärmeenergie des Wassers nach oben transportiert, es handelt sich um Konvektion, die durch den Dichteunterschied des Wassers angetrieben wird.

2.8.5 Konvektion sorgt für schnellere Abkühlung bei größerer Oberfläche

Material:

- ✓ 2 kleinere Messbecher
- ✓ 2 größere Messbecher, in die der Inhalt zweier kleinerer Gefäße passt
- ✓ Heißes Wasser

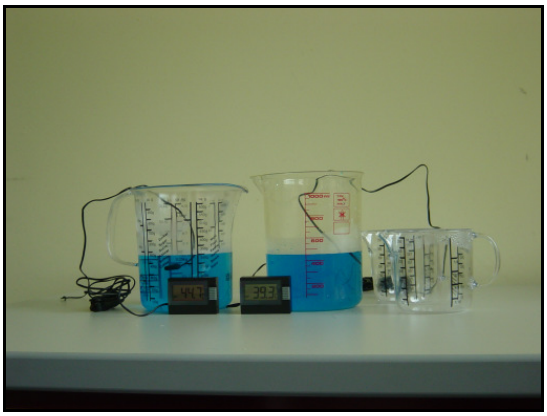

Bild 51: Unterschiedliche Abkühlzeit bei größerer Oberfläche (rechts) und kleinerer Oberfläche (links).

Aufbau und Durchführung:

In den großen Messbecher wird dieselbe Menge heißes Wasser gefüllt, wie in die beiden kleineren zusammen. Die drei Messbecher werden nun in mindestens 30 cm Entfernung von einander aufgestellt und ungefähr 15 Minuten stehen gelassen. Nach dieser Zeit, schüttet man den Inhalt der kleineren Messbecher in den leeren großen Messbecher und misst in beiden die Temperatur. Man sieht deutlich, das Wasser im Messbecher in den der Inhalt der kleineren Becher geschüttet wurde hat die niedrigere Temperatur.

Erklärung:

Die Abgabe der Wärme aus den Gefäßen erfolgt hier hauptsächlich durch Konvektion der erwärmten Luft am Rand des Messbechers. Die gesamte Wärmemenge der Flüssigkeit wird im gesamten Volumen verteilt, die Abgabe der Wärme erfolgt aber über die Oberfläche. Bei jenem Gefäß bei dem das Wasser nicht gleich zu Beginn gemischt wurde, ist die Oberfläche im Verhältnis zum Volumen geringer als im anderen Fall. Also ist in diesem noch mehr Wärme vorhanden, was die höhere Temperatur erklärt.

2.8.6 Ein Laufrad über einer Kerze

Material:

- ✓ Papier
- ✓ Schere
- ✓ Zwirn
- ✓ Kerze
- ✓ Bleistift

Bild 52: Laufrad über einer Kerze.

Aufbau und Durchführung:

Mit dem Bleistift wird eine Spirale mit ca. 10 cm Durchmesser gemalt. Die Breite der einzelnen Windungen soll ungefähr einen Zentimeter betragen. Eine mögliche Vorlage findet man im Buch „Experimente mit Spass – Wärme“ von Werner Rentzsch[22]. Die Spirale wird ausgeschnitten und man befestigt im Mittelpunkt den Zwirn durch ein kleines Loch. Die Vorrichtung hängt man ungefähr 30 cm über die brennende Kerze, wobei Zugluft weitgehend vermieden werden soll. Die Spirale beginnt sich in eine Richtung zu drehen, bis der Zwirn verdrillt ist.

Erklärung:

Die warme Luft über der Kerze steigt nach oben und die Luftmoleküle geben ihren Impuls an das Laufrad weiter.

[22] Rentzsch: Experimente mit Spass – Wärme; 1. Auflage; Verlag Hölder-Pichler-Tempsky; 1995; S. 119.

2.8.7 Der fliegende Teebeutel

Material:

- ✓ Teebeutel
- ✓ Feuerzeug

Bild 53: Entzündung eines leeren Teebeutels.

Aufbau und Durchführung:

Zuerst entfernt man die Klammer aus dem Teebeutel und leert den Inhalt aus dem Beutel. Den Beutel stellt man nun auf eine feuerfeste Unterlage und zündet ihn am oberen Ende mit dem Feuerzeug an. Der Beutel brennt nach unten ab, kurz bevor er aber vollständig verbrannt ist, beginnt die Asche abzuheben und davon zu schweben.

Erklärung:

Die Flamme erwärmt die Luft neben dem Teebeutel. Durch die unterschiedliche Temperatur entsteht eine Wärmeströmung und die wärmere Luft steigt nach oben. Die leichten Teilchen der Asche werden in dieser Wärmeströmung mit nach oben gehoben.

2.8.8 Konvektion in einem Rohsystem

Material:

- ✓ Schlauch (ca. 40 – 60 cm)
- ✓ Glasstab
- ✓ Wasser und Tinte
- ✓ Glas
- ✓ Kerze

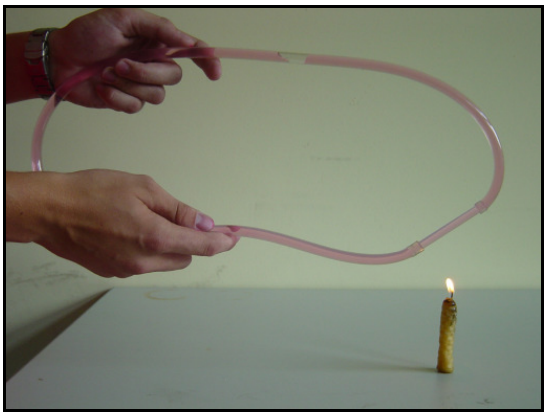

Bild 54: Wasserkreislauf mittels Konvektion.

Aufbau und Durchführung:

Der Glasstab wird in eine Öffnung des Schlauches gesteckt. Wichtig dabei ist, dass Schlauch und Glasrohr genau ineinander passen. In dem Glas mischt man das Wasser mit der Tinte. Nun füllt man den Schlauch und das Glasrohr mit dem gefärbten Wasser. Am einfachsten funktioniert dies, indem man den Schlauch in das Glas hält und das Ende mit dem Glasrohr auf ein Niveau unter dem Glas bringt. Anschließend braucht man nur noch kurz am Glasrohr zu saugen und das gefärbte Wasser sollte von alleine in den Schlauch und das Rohr fließen. Ist beides gefüllt, verbindet man das zweite Schlauchende mit dem Glasrohr, sodass ein geschlossener Kreislauf entsteht. Diesen Ring hält man nun, wie auf dem Bild, mit dem Glasrohr über die brennende Kerze. Im Rohrsystem entsteht ein Wasserkreislauf.

Erklärung:

Die Kerzenflamme erwärmt das Wasser im Glasrohr. Dieses Wasser ist nun wärmer als das Wasser im Schlauch und versucht nun im Schlauchring nach oben zu steigen. Vom anderen Ende kann wieder kühleres Wasser nachlaufen, womit ein durch Konvektion betriebener Kreislauf entsteht.

2.9 Wärmestrahlung

2.9.1 Physikalischer Hintergrund

Neben Wärmeleitung und Konvektion kann Wärmeenergie auch durch Wärmestrahlung übertragen werden. Wärmestrahlung besteht aus elektromagnetischen Wellen mit Wellenlänge größer als der des sichtbaren Lichts im Bereich von

$$10^{-6}\,\mathrm{m} < \lambda < 10^{-4}\,\mathrm{m}^{23}.$$

Emission kommt zustande, wenn beschleunigte Ladungen ein elektromagnetisches Feld aussenden, dies können vor allem schwingende molekulare Ladungen oder Elektronen in einem Metall sein. Die Aussendung dieses Feldes geht zu Lasten der kinetischen Energie, der Körper kühlt also ab.

Bei der Absorption werden Moleküle oder Atome in dem bestrahlten Körper durch das elektromagnetische Feld der Strahlung in Bewegung versetzt und der Körper erwärmt sich.
Strahlen, die auf einen Körper fallen werden nicht zu 100% absorbiert, es besteht auch die Möglichkeit der Reflexion oder des Durchtretens der Wellen. Definiert man
Φ_0 als Strahlungsfluss der auftreffenden Strahlung,
Φ_r als Strahlungsfluss der reflektierten Strahlung,
Φ_a als Strahlungsfluss der absorbierten Strahlung und
Φ_t als Strahlungsfluss der durchgelassenen Strahlung,
so kann man den Reflexionsgrad ρ

$$\rho = \frac{\Phi_r}{\Phi_0},$$

Formel 2.9-1

den Transmissionsgrad τ

$$\tau = \frac{\Phi_t}{\Phi_0}$$

Formel 2.9-2

und den Absorptionsgrad α

[23] Müller: Grundzüge der Thermodynamik; 2. Auflage; Springer; 1999; S. 209.

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_0}$$

Formel 2.9-3

definieren.

.

Es muss gemäß dem Energieerhaltungssatz gelten:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Formel 2.9-4

Für viele Feststoffe und Flüssigkeiten ist τ praktisch null und kann vernachlässigt werden. Nach den unterschiedlichen Größen von τ, ρ und α kann man Körper klassifizieren als:

schwarz,	wenn er alle auftreffenden Strahlen absorbiert ($\alpha = \varepsilon = 1$)
weiß,	wenn er alle Strahlen reflektiert
grau,	wenn er von allen Wellenlängen denselben Bruchteil absorbiert ($\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda$)
farbig,	wenn beim Auftreffen der Strahlung bestimmte Wellenlängen (eben die der „Farbe“ entsprechenden) bevorzugt reflektiert werden
spiegelnd,	wenn alle auftreffenden Strahlen unter dem gleichen Winkel (bezogen auf die Flächennormale) reflektiert werden
matt,	wenn die Strahlen nach allen Richtungen diffus verstreut werden

Tabelle 4: Klassifizierung von Körpern nach Absorptionsverhalten[24]

Besonders interessant ist dabei die Strahlung eines schwarzen Körpers. Im Gegensatz zu anderen Körpern, ist die emittierte Strahlung eines schwarzen Körpers nur von der Temperatur abhängig und nicht vom Material. Deshalb eignet sich die Schwarzkörperstrahlung auch hervorragend als Bezugsgröße, um Strahlungen miteinander in Beziehung zu setzen. Das spektrale Emissionsverhalten ε eines beliebigen Körpers kann als Verhältnis der emittierten Energieflussdichte des Körpers und der emittierten Energieflussdichte eines schwarzen Körpers gleicher Temperatur definiert werden. Damit ist

[24] Wagner; Wärmeübertragung; 3. Auflage; Vogel Fachbuch; 1991; S.119.

die so definierte Größe für einen weißen Körper 0, für einen schwarzen Körper 1. Die Strahlungsleistung eines Körpers wird im Stefan-Bolzmanngesetz ausgedrückt. Gilt:

P…Strahlungsleistung

ε…spektrales Emissionsverhalten des Strahlers

A…Flächeninhalt der Oberfläche des Strahlers

T…Temperatur des Strahlers

so ist

$$P = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T^4$$

Formel 2.9-5

mit

$$\sigma = 5{,}670 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^4$$

als so genannte Strahlungskonstante. In vielen Büchern ist für σ auch Stefan-Bolzmann-Konstante zu lesen. Diese Formel gibt nur das Strahlungsverhalten eines Körpers an und berücksichtigt nicht, ob der Strahler im selben Augenblick auch Strahlung aufnimmt. Die Strahlungsleistung der Umgebung kann auch über das oben formulierte Gesetz beschrieben werden, man muss lediglich die Temperatur T_U der Umgebung verwenden. Die Leistungsbilanz ist dann

$$P = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T^4 - T_U^4)$$

Formel 2.9-6

Wobei in dieser Überlegung die strahlende und die absorbierende Fläche denselben Betrag haben müssen. Das Bemerkenswerte daran ist die Abhängigkeit der Leistung von der vierten Potenz der Temperatur, was zu einem rasanten Anstieg der Strahlungsleistung bei wachsender Temperatur führt.

Betrachtet man die Strahlung eines schwarzen Körpers, so kann man die Strahlung bei niedrigen Temperaturen (800 K) nicht sehen, also muss sie eine Wellenlänge größer als jene des sichtbaren Lichts haben. Bei steigender Temperatur beginnt der Körper zuerst rot dann gelb und anschließend weiß zu glühen. Offensichtlich wird die Wellenlänge der Strahlung bei höherer Temperatur kleiner, einen Zusammenhang den das Wiensche Verschiebungsgesetz beschreibt.

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \mu m$$

Formel 2.9-7

Wobei λ_{max} die Wellenlänge des Strahlungsmaximums beschreibt.

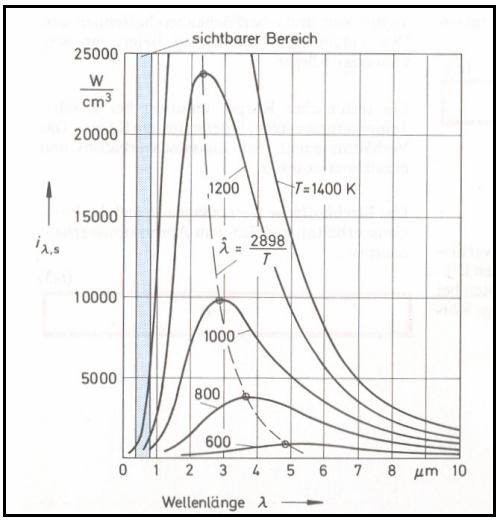

Bild 55: Energieverteilung der schwarzen Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge[25].

2.9.2 Der Wärmehaushalt der Haut

Material:

- ✓ 1 isolierende Folie, etwa eine Rettungsdecke
- ✓ 1durchsichtiger Plastiksack
- ✓ Klebeband, Gummibänder
- ✓ Digitales Innen- Außenthermometer oder zwei gleichwertige Thermometer

Bild 56: Wärmehaushalt der menschlichen Haut.

Aufbau und Durchführung:

Aus der Folie bastelt man sich einen Sack, in dem ein Arm Platz hat. Eine Versuchsperson nimmt den Außenfühler in die Hand und steckt diese in den, aus isolierender Folie hergestellten Sack. Die zweite Hand wird zusammen mit dem Anzeigegerät in den

[25] Wagner; Wärmeübertragung; 3. Auflage; Vogel Fachbuch; 1991; S. 120.

durchsichtigen Plastiksack verpackt, so dass man die Temperaturanzeigen noch lesen kann. Wichtig ist, dass die Hände die Temperaturfühler nicht umschließen. Schon nach wenigen Minuten zeigt sich, dass sich die Temperatur in der Folie deutlich stärker erhöht.

Erklärung:

Weder in der Folie noch im Plastiksack kann die Wärme durch Konvektion entweichen. Ein menschlicher Körper hat ca. 1,5 m² Hautoberfläche, über die ständig Wärme in Form von Strahlung abgegeben wird. Beide Säcke im Experiment hindern die Strahlung davon in die Umgebung zu entweichen. Hierbei ist der Plastiksack aber ein schlechterer Isolator als der andere Sack mit seiner reflektierenden Oberfläche. In dem einen Sack bleibt also mehr Wärme für längere Zeit enthalten, was die merkbare Temperaturdifferenz erklärt.

2.9.3 Die tanzende Münze

Material:

- ✓ Wärmelampe
- ✓ 2- Liter Glasflasche
- ✓ Münze

Bild 57: Flasche mit Münzventil unter Wärmestrahlung.

Aufbau und Durchführung:

Die Öffnung der Flasche wird gut befeuchtet und die Münze anschließend darauf gelegt. Nun bestrahlt man die Flasche mit der Wärmelampe. Schon nach kurzer Zeit beginnt die Münze sich kurz zu heben und fällt wieder auf die Öffnung zurück. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrmals.

Erklärung:

Wärme kann mittels Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung übermittelt werden. Da sich zwischen Lampe und Flasche aber Luft befindet und die Wärmeleitung von Gasen im Allgemeinen sehr schlecht ist, kann Wärmeleitung hier nicht im Spiel sein. Vermeidet man obendrein Zugluft, so sollte auch keine Konvektion auftreten. Die Wärme wird also fast zur Gänze durch Wärmestrahlung auf die Flasche übertragen. Diese Energie erwärmt dann die Luft in der Flasche, die sich nach den Gasgesetzen ausdehnt und die Münze anhebt. Details dazu in Versuch 2.3.2.

2.9.4 Reflexion von Wärmestrahlen

Material:

- ✓ Wärmelampe
- ✓ Thermometer mit Halterung
- ✓ Alufolie
- ✓ Schwarzes Papier
- ✓ Klebestreifen
- ✓ Trennwand (Mappe, Holzbrett…)

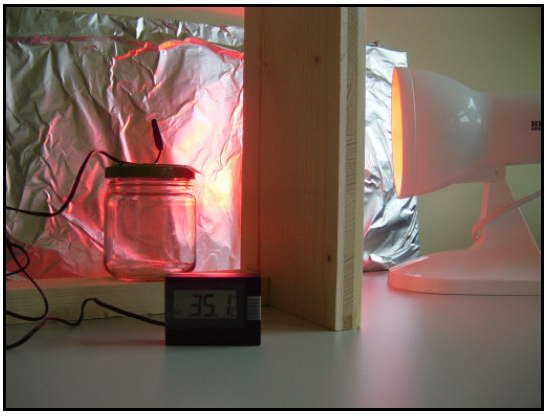

Bild 58: Reflexion der Wärmestrahlung auf Alufolie.

Bild 59: Reflexion der Wärmestrahlung auf schwarzer Oberfläche.

Aufbau und Durchführung:

An einer Wand wird zuerst die Alufolie befestigt. Die Wärmelampe wird so vor der Folie postiert, dass die Strahlen schräg auf die Folie auftreffen. Das Thermometer wird in gleicher Höhe neben der Lampe montiert, und der Abstand zur Lampe über das Reflexionsgesetz ermittelt. Das Thermometer soll also im Strahlenverlauf der Lampe sein, durch eine Trennwand wird ein direktes Anscheinen des Thermometers verhindert. Nun schaltet man die Lampe für ein paar Minuten ein und misst den Temperaturanstieg. Ersetzt man nun die Folie durch das schwarze Papier und schaltet die Lampe erneut ein, so wird der Temperaturanstieg merklich geringer sein als bei der Alufolie.

Erklärung:

Unterschiedliche Oberflächen absorbieren Wärme unterschiedlich stark. Spiegelnde Oberflächen wie das Aluminium reflektieren nahezu die gesamte auftreffende Strahlung nach dem Reflexionsgesetz. Körper mit schwarzer Oberfläche hingegen absorbieren praktisch die gesamte Strahlung und es kommt zu keiner Reflexion, wie beim Papier. Das Thermometer befindet sich im Strahlengang der reflektierten Strahlen, weil aber bei der Alufolie mehr Strahlen reflektiert werden, erhöht sich auch die Temperatur stärker.

2.9.5 Emissions- und Absorptionsvermögen unterschiedlicher Oberflächen

Material:

- ✓ 2 Konservendosen
- ✓ schwarzen Lack oder Spray
- ✓ weißen Lack oder Spray
- ✓ Wärmelampe
- ✓ 2 Thermometer
- ✓ Wasser

Aufbau und Durchführung: Absorptionsvermögen

Die eine Dose wird mit weißem, die andere mit schwarzem Lack bemalt oder mit Spray gefärbt und anschließend mit Wasser gefüllt. Nun bestrahlt man die Dosen mit der Wärmelampe und misst den Temperaturverlauf des Wassers in den beiden Dosen. Die Temperatur in der Dose mit schwarzer Oberfläche steigt schneller an als die Temperatur in der zweiten Dose.

Aufbau und Durchführung: Emissionsvermögen

Die eine Dose wird mit weißem, die andere mit schwarzem Lack bemalt oder mit Spray gefärbt und anschließend mit Wasser gefüllt. Nun misst man den Temperaturverlauf des Wassers in den beiden Dosen. Die Temperatur in der Dose mit schwarzer Oberfläche fällt schneller als die Temperatur des Wassers in der Dose, die mit weißer Farbe bemalt wurde.

Erklärung:

Dunkle Oberflächen nehmen Wärme stärker auf als es helle Oberflächen tun. Damit ist klar, dass sich das Wasser in der Dose mit der schwarzen Farbe stärker unter dem Wärmeeinfluss der Wärmelampe erwärmt als es das Wasser in der zweiten Dose tut. Gleichzeitig haben aber dunkle Oberflächen auch einen höheren Emissionsgrad als hellere Oberflächen. Schwarze Oberflächen geben also schneller Wärme ab als es weiße Oberflächen tun, was im zweiten Teil des Experimentes passiert ist. Als Variante könnte auch eine dritte Dose ohne Bemalung, also mit reflektierender Oberfläche verwendet werden.

2.10 Mechanisches Wärmeäquivalent

2.10.1 Physikalischer Hintergrund

Historisch betrachtet wurde Wärme lange Zeit nicht als eine Erscheinungsform von Energie angesehen, sondern als fluide Substanz mit ganz bestimmten Eigenschaften. Diese Vorstellung, mit der sich schon Heraklit und Lukrezius auseinander setzten, wurde Mitte des 18. Jahrhunderts sogar noch verstärkt, weil damals bekannte gewordene Erkenntnisse zur Wärmekapazität und Schmelzwärme durchaus im Einklang mit diesem Konzept standen. Dieses Wärmefluid war ein Stoff konstanter Menge, der nicht verschwinden oder entstehen konnte. Warme Körper hatten mehr von diesem Fluid gespeichert als kalte. Weil aber ein warmer Körper keine größere Masse hatte als ein kalter, muss das Wärmefluid massenlos sein. Mit der Zeit zeigte sich aber bei immer mehr Experimenten und Vorgängen im täglichen Leben, dass diese Stofftheorie der Wirklichkeit nicht standhielt.

Die Wärmemenge eines Systems ist nicht konstant, sondern Wärme kann auch gewonnen und umgewandelt werden. Der Wärmeerhaltungssatz musste dem Satz von der Energieerhaltung weichen, und die Wärme selbst war nur noch eine Form der Gesamtenergie. Diesen engen Zusammenhang zwischen mechanischer Energie, elektrischer Energie und Wärmeenergie erkannte R. Mayer Mitte des 19. Jahrhunderts. Was noch fehlte war aber ein Brückenschlag, der die Wärmeenergie mit anderen Energieformen verbinden konnte. Dieser gelang J. P. Joule mit seinem berühmten Schaufelradexperiment. Resultat von Jouls Bemühungen war ein konstanter Umrechungsfaktor in der Größe von ψ = 0,238846 J/cal[26] zwischen Arbeit und thermischer Energie, der als mechanisches Wärmeäquivalent bezeichnet wird. Demnach war 1 kcal = 427 kpm[27], was in SI-Einheiten 4186 Nm entspricht. Als ein Joule wird der Wärmewert von 1 Nm bezeichnet, womit die Einheit Kalorie obsolet ist und in der modernen Wissenschaft keine Rolle mehr spielt.

[26] Bergmann/Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik; 11. Auflage; Walter de Gruyter; 1998; S. 1032.
[27] Dietzel: Technische Wärmelehre; 1. Auflage; Vogel-Verlag; 1976; S. 38.

2.10.2 Der gebogene Kleiderbügel

Material:

- ✓ Metallkleiderbügel (wie man sie in Putzereien bekommt)

Bild 60: Biegen eines Metallkleiderbügels.

Aufbau und Durchführung:

Man verbiegt den Kleiderbügel mehrmals schnell an der gleichen Stelle. Mit den Fingern kann man eine starke Erwärmung an der Biegestelle fühlen.

Erklärung:

Um den Kleiderbügel zu deformieren ist Energie notwendig, die beim Biegen zugeführt wird. Gemäß dem Energieerhaltungssatz kann Energie aber nicht verloren gehen sondern muss in irgendeiner Form gespeichert bleiben. Dies passiert durch die Erwärmung der Biegestelle des Kleiderbügels. Die mechanische Energie wird also in Wärme umgewandelt.

2.10.3 Wärmeentwicklung an einer Bohrmaschine

Material:

- ✓ Bohrmaschine
- ✓ 1 Holzstück

Aufbau und Durchführung:

Mit der Bohrmaschine wird in das Holzstück ein Loch gebohrt. Fühlt man anschließend mit den Fingern an die Spitze des Bohrers, so bemerkt man dort eine starke Zunahme der Wärme.

Erklärung:

Um in das Holzstück in Loch zu bohren ist mechanische Arbeit und damit Energie notwendig, um die nötige Deformation zu leisten. Diese Energie kann aber nicht verloren gehen, sondern muss irgendwo gespeichert werden, was in der Wärmezunahme des Bohrkopfes geschieht. Dieser Versuch ist dem Schaufelradversuch von J. P. Joule nicht unähnlich. Joule verwendete ein Schaufelrad in einem isolierten mit Flüssigkeit gefüllten Gefäß. Durch die Drehung des Rades konnte er eine Temperaturzunahme der Flüssigkeit feststellen.

2.11 Entropie

2.11.1 Physikalischer Hintergrund

Neben der Temperatur, dem Druck und dem Volumen ist die Entropie eine weitere Zustandsfunktion in der Thermodynamik. Sie gibt den Grad der Unordnung im System an, wobei Unordnung als Zahl der möglichen erreichbaren Mikrozustände verstanden werden muss. Da in den meisten Fällen nur die Änderung der Entropie ΔS von Interesse ist, genügt es, die Beziehung

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$$

Formel 2.11-1[28]

zu betrachten. dQ ist dabei die mit der Umgebung ausgetauschte Wärmemenge des Systems und T die absolute Temperatur.

Verwendet man den ersten Hauptsatz der Wärmelehre und ein ideales Gas, so kann man für Gase wie folgt vorgehen:

$$dQ = dU + p \cdot dV$$
$$p \cdot dV = n \cdot R \cdot T \cdot \frac{dV}{V}$$
$$dU = n \cdot C_M \cdot dT$$

Formel 2.11-2

mit:

dU	Änderung der inneren Energie des Gases
p	Druck
dV	Änderung des Volumens
V	Volumen
R	Universelle Gaskonstante
n	Molzahl
dT	Änderung der Temperatur
C_M	Molare Wärmekapazität, wird als konstant angenommen

[28] Tipler: Physik; 1. Auflage; Spektrum Akademischer Verlag; 1994; S. 601.

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} = \int \frac{dU + p \cdot dV}{T} = \int \frac{dU}{T} + \int \frac{p \cdot dV}{T} = n \cdot C_M \cdot \int \frac{dT}{T} + n \cdot R \cdot \int \frac{dV}{V} = n \cdot C_M \cdot \ln T + n \cdot R \cdot \ln V$$

Formel 2.11-3

Ändert sich das Volumen während des Prozesses von V_0 auf V_1 und die Temperatur von T_0 auf T_1, so ergibt das bestimmte Integral:

$$\Delta S = n \cdot C_M \cdot \ln T_1 + n \cdot R \cdot \ln V_1 - n \cdot C_M \cdot \ln T_0 - n \cdot R \cdot \ln V_0$$

Formel 2.11-4

beziehungsweise

$$\Delta S = n \cdot C_M \cdot \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) + n \cdot R \cdot \left(\frac{V_1}{V_0}\right)$$

Formel 2.11-5

Man sieht die Temperaturabhängigkeit der Entropie im ersten Term und die Abhängigkeit von der Änderung des Volumens im Zweiten.
Bei reversiblen Zustandsänderungen bleibt die Entropieänderung des gesamten Systems null, bei irreversiblen Prozessen hingegen nimmt die Entropie des Systems zu, indem ein Teil der für den Prozess notwenigen Energie entwertet wird und als Wärme im System verbleibt. Es ergibt sich daraus das allgemein gültige Prinzip, dass die Gesamtentropie eines Systems nicht abnimmt sondern stets zunehmen muss.

Es folgen zwei einfache Demonstrationsversuche, die zwei wesentliche Eigenschaften der Entropie unterstreichen sollen.

2.11.2 Es kostet Energie, die Entropie eines Systems zu verringern

Material:

- ✓ Salz
- ✓ Pfeffer (oder zwei andere leicht unterscheidbare Pulver)

Bild 61: Salz- und Pfeffergemisch.

Aufbau und Durchführung:

Es soll das Prinzip bildlich dargestellt werden, was es bedeutet die Unordnung nimmt sehr schnell zu, dass sie aber nur unter Aufwand von Energie wieder beseitigt werden kann. Zu diesem Zweck werden Salz und Pfeffer auf ein Blatt Papier gegeben und vermischt.

Erklärung:

Unordnung kann sehr schnell erzeugt werden, aber nur schwer vernichtet werden. Das Trennen von Salz und Pfeffer erfordert wesentlich mehr Aufwand als das Mischen. Es muss viel mechanische Arbeit beim Sortieren oder den Einsatz elektrischer Energie investiert werden.

2.11.3 Der Zustand größter Unordnung ist der Wahrscheinlichste

Material:

- ✓ 4 Münzen
- ✓ Schreibzeug

Bild 62: Das Ergebnis KKZZ bei einem Münzwurf.

Aufbau und Durchführung:

Es werden möglichst oft alle 4 Münzen gleichzeitig geworfen und notiert welche Kopf-Zahlkombinationen auftreten. Möglich sind 4x Kopf (KKKK), 3x Kopf und 1x Zahl (KKKZ), 2x Kopf und 2x Zahl (KKZZ), 1x Kopf und 3x Zahl (KZZZ) sowie 4x Zahl (ZZZZ). Bei genügend großer Zahl an Wiederholungen sieht man deutlich, wie der Zustand der größten Unordnung (KKZZ) am häufigsten vorkommt.

Erklärung:

Mathematisch betrachtet handelt es sich hier um ein diskretes Zufallsexperiment, dem eine Binomialverteilung zugrunde liegt.

$$P(X = k) = \binom{n}{k} \cdot p^k \cdot q^{n-k}$$

Formel 2.11-6

Die Wahrscheinlichkeiten (für Kopf (p) und Zahl (q)) sind jeweils ½, n steht für die Zahl der Würfe, (in diesem Fall also n = 4) und die Variable k zählt die Zahl der Köpfe und nimmt die Werte 0-4 an. Die Zufallsvariable X steht für die Zahl der geworfenen Köpfe. Berechnet man alle fünf Fälle erhält man:

$$P(X = 0) = \binom{4}{0} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^4 = \frac{1}{16}$$

Formel 2.11-7

$$P(X = 1) = \binom{4}{1} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^1 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{4}{16}$$

Formel 2.11-8

$$P(X=2)=\binom{4}{2}\cdot\left(\frac{1}{2}\right)^2\cdot\left(\frac{1}{2}\right)^2=\frac{6}{16}$$

Formel 2.11-9

$$P(X=3)=\binom{4}{3}\cdot\left(\frac{1}{2}\right)^3\cdot\left(\frac{1}{2}\right)^1=\frac{4}{16}$$

Formel 2.11-10

$$P(X=4)=\binom{4}{4}\cdot\left(\frac{1}{2}\right)^4\cdot\left(\frac{1}{2}\right)^0=\frac{1}{16}$$

Formel 2.11-11

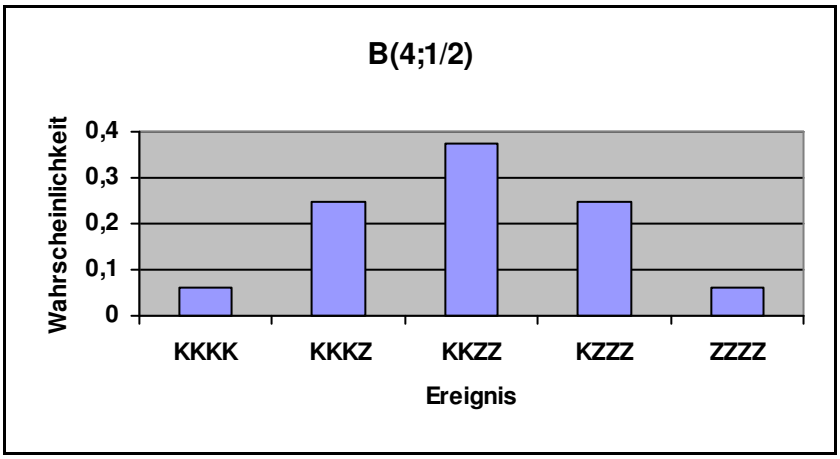

Bild 63: Binomialverteilung mit B(4; 1/2).

Dies bedeutet, die Wahrscheinlichkeit, die Kombination KKZZ zu erhalten, ist wesentlich größer als KKKK zu werfen. KKZZ ist aber gerade jene Anordnung, die am meisten Unordnung hat.

Mit der Entropie verhält es sich ähnlich. Es ist unwahrscheinlich, dass sich beispielsweise alle Teilchen eines Systems gleichzeitig in dieselbe Richtung bewegen.

2.12 Das besondere Verhalten von Wasser

2.12.1 Physikalischer Hintergrund

Kein Stoff spielt in der Wärmelehre eine so wichtige Rolle wie das Wasser und hat einen so großen Einfluss auf unsere Umwelt. Die Meere und Ozeane beeinflussen das Klima der Welt, und in Form von Niederschlag, Luftfeuchtigkeit und Nebel beeinflusst das Wasser auch das lokale Wetter. Wasser unterscheidet sich durch den dipolaren Aufbau seines Moleküls sehr stark von anderen Stoffen unserer Umgebung. Eine wichtige Konsequenz daraus ist ein Effekt, den man die Anomalie des Wassers nennt.

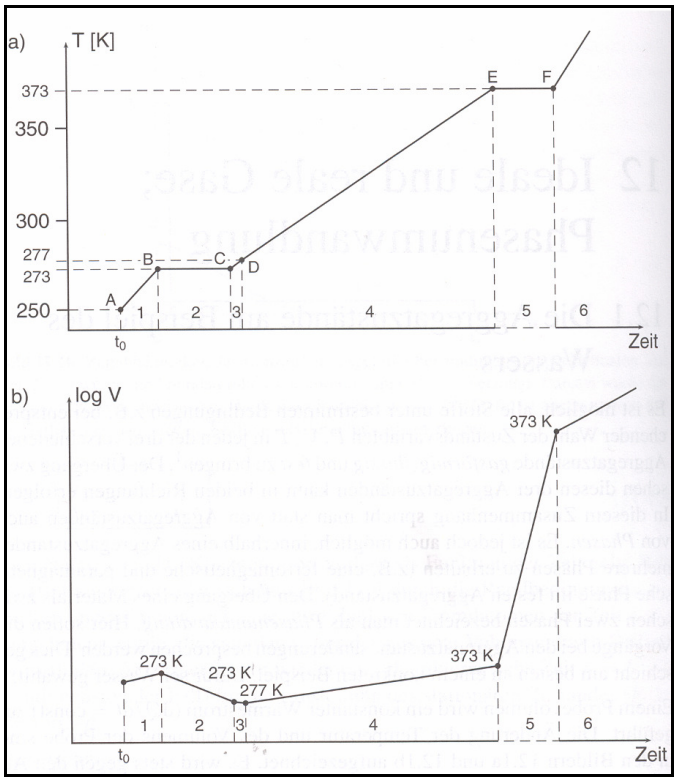

Bild 64: Änderung der Temperatur (a) und des Volumens (b) von Eis, Wasser und Wasserdampf bei Zuführung eines zeitlich konstanten Wärmestromes[29].

Das Diagramm zeigt die Abhängigkeit des Volumens von Wasser in den drei Aggregatzuständen von der Temperatur. Der erste Teil der Kurve zeigt den Anstieg des Volumens von Eis bei Wärmezufuhr. Bei 0ºC beginnt der Schmelzvorgang, bei dem die flüssige und die feste Variante des Wassers zeitgleich existieren. Zwar steigt auch hier die Temperatur wie bei anderen Stoffen nicht an, im Gegensatz zu anderen Stoffen sinkt aber das

[29] Dransfeld/Kienle/Kalvius: Physik 1; 9. Auflage; Oldenburg Wissenschaftsverlag; 2001; S. 342.

Volumen. Erwärmt man die Flüssigkeit weiter, so sinkt das Volumen bis 4ºC erreicht sind, erst dann beginnt sich das Volumen zu vergrößern. Wasser hat also bei 4ºC die größte Dichte und das kleinste Volumen. Die Erklärung liefert die Struktur, durch die Eis gebildet wird. Die Dipole legen sich so aneinander, dass positive und negative Pole sich abwechseln. Diese Struktur ist zwar der Grund für die Bildung von Eiskristallen, sie ist aber nicht sehr effizient beim Füllen des Raumes. Es bleiben viele Leerräume zwischen den Molekülen frei. Beim Schmelzen füllen die bereits geschmolzenen Moleküle diese Leerräume auf, was insgesamt eine Reduktion des Volumens mit sich bringt. Erst bei 4ºC nimmt die thermische Bewegung der Moleküle überhand und das Volumen steigt wieder an.

2.12.2 Ballons unterschiedlicher Dichte

Material:

- ✓ 2 Luftballons
- ✓ Wanne mit Wasser gefüllt
- ✓ Kälteres Wasser als das Wasser in der Wanne
- ✓ Wärmeres Wasser als das Wasser in der Wanne

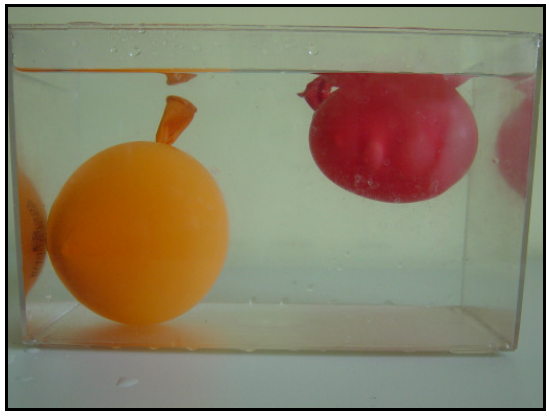

Bild 65: Luftballons in Wanne. Im Vergleich zu Wasser in der Wanne, ist der rote Ballon mit wärmen, der orange mit kälteren Wasser gefüllt.

Aufbau und Durchführung:

Die Wanne ist mit Wasser gefüllt. Die 2 Luftballons werden mit unterschiedlich temperiertem Wasser gefüllt: Ein Ballon mit wärmerem Wasser und einer mit kälterem Wasser. Wichtig ist, dass in den Ballons keine Luftkammer bleibt und die Ballons nur mit Wasser gefüllt sind. Nun hält man beide Ballons in die Wanne. Der Ballon mit dem warmen Wasser steigt auf und schwimmt, der kältere Ballon geht unter.

Erklärung:

Sieht man von dem Temperaturintervall zwischen 0 und 4ºC ab, bei dem die Anomalie des Wassers zu tragen kommt, verhält sich Wasser bei Erwärmung wie andere Stoffe. Bei höherer Temperatur dehnt es sich aus, was mehr Volumen und weniger Dichte bedeutet. Das warme Wasser im Ballon hat also eine geringere Dichte, als Wasser in der Wanne. Analog dazu hat das kühlere Wasser im anderen Ballon weniger Dichte. Stoffe mit größerer Dichte sinken ab, Stoffe mir kleinerer Dichte schwimmen.

2.12.3 Anomalie des Wassers

Material:

- ✓ Glas
- ✓ 2 Thermometer
- ✓ Kaltes Wasser
- ✓ Eiswürfel
- ✓ Eventuell Stativ und Stativmaterial

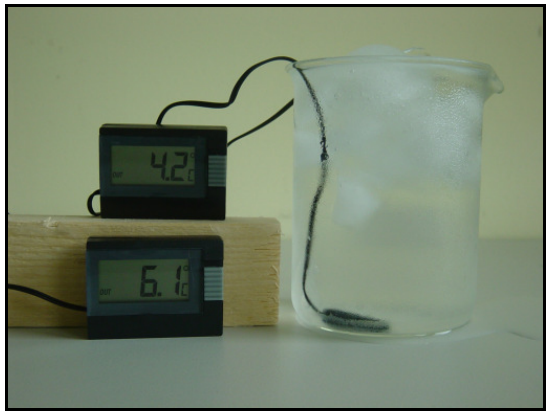

Bild 66: Das Verhalten von Wasser bei niedriger Temperatur.

Aufbau und Durchführung:

Das Glas wird zur Hälfte mit Eiswürfeln gefüllt. Über die Eiswürfel schüttet man nun das kaltes Wasser, bis das Glas bis obenhin gefüllt ist. Die Thermometer werden mit dem Stativ oder der Hand so fixiert, dass ein Thermometer fast bis zum Boden des Glases und das andere oben in das Eiswasser ragt. Nach einiger Zeit sieht man, die Temperatur im unteren Ende des Glases fällt nicht unter 4ºC, während im Eiswasser nahe der Oberfläche niedrigere

Temperaturen als am Boden gemessen werden. Aufgrund des Wärmeverlustes an die Umgebung, wird das Wasser am Boden die 4ºC allerdings nicht ganz erreichen. Im vergleich zu Versuch 2.12.2., sinkt hier aber das Wasser höherer Temperatur nach unten.

Erklärung:

Die Anomalie des Wassers beschreibt den Effekt, dass sich das Volumen von Wasser bei der Erwärmung von 0 auf 4ºC nicht ausdehnt sondern reduziert. Wasser hat also bei 4°C seine größte Dichte. Somit sinkt das 4°C kalte Wasser unter jene Wasserschicht mit 0°C im Eiswasser, das mit geringer Dichte ausgestattet ist. Der Grund für diesen Effekt ist der Dipolcharakter der Wassermoleküle. Diese ordnen sich beim Gefrieren in Strukturen an, die sehr viel Zwischenraum zwischen den Molekülen lassen. Bei Wärmezufuhr brechen Moleküle aus dieser Struktur aus und füllen diese Zwischenräume auf, was insgesamt eine Reduktion des Volumens mit sich bringt.

2.12.4 Eis hat größeres Volumen als Wasser

Material:

- ✓ Tiefkühlfach
- ✓ Leere Getränkedose oder Tablettenröhrchen
- ✓ Wasser

Bild 67: Wasser hat im gefrorenen Zustand ein größeres Volumen.

Aufbau und Durchführung:

Die Dose wird bis an den Rand mit Wasser gefüllt und in das Tiefkühlfach gestellt. Nach mehreren Stunden sollte das Wasser gefroren sein, und man kann die Dose wieder aus dem Kühlfach nehmen. Man sieht, wie etwas Eis aus der Dosenöffnung quillt.

Erklärung:

Eis hat bei 0°C eine Dichte von 0,917 kg/dm³ Wasser aber 0,9982 kg/dm³[30]. Im Tiefkühlfach wird es kaum zu einer Verringerung der Masse auf Grund von Verdampfen oder Sublimieren kommen, die Masse des Wassers bleibt also unverändert. Demnach muss sich das Volumen vergrößern, was die ausgetretene Eisschicht an der Dosenöffnung erklärt.

Wichtig: Der Versuch soll nicht mit einem Glasgefäß durchgeführt werden. Die Ausdehnung könnte zu Sprüngen oder gar zu Zerstörung des Gefäßes führen. Dieses Phänomen ist auch an den Frostbrüchen bei Gebäuden und Straßen im Winter schuld.

2.12.5 Unterkühltes Wasser

Material:

- ✓ Gefäß
- ✓ Eiswürfel
- ✓ Kaltes Wasser
- ✓ Salz
- ✓ Thermometer

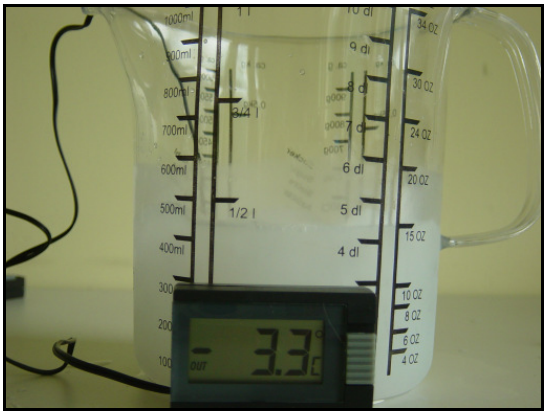

Bild 68: Eiswasser mit Kochsalz gemischt. Die Temperatur liegt unter 0ºC.

[30] Kuchling: Taschenbuch der Physik; 17. Auflage; Carl Hanser Verlag; Tabelle 1.

Aufbau und Durchführung:

In dem Gefäß wird mit den Eiswürfeln und dem Wasser Eiswasser hergestellt. Wird nun Kochsalz in das Eiswasser gerührt, so fällt die Temperatur kontinuierlich bis unter den Gefrierpunkt, was mit dem Thermometer nachgewiesen werden kann.

Erklärung:

Das Kochsalz besteht aus Na^+ und Cl^- - Ionen. Beim Lösen im Eiswasser werden diese Ionen entgegen der elektrostatischen Anziehung voneinander getrennt. Die dafür notwendige Energie wird der inneren Energie des Eiswassers entnommen, wodurch die Temperatur fällt. Ein gutes Mischungsverhältnis um möglichste tiefe Temperaturen zu erhalten, ist das Verhältnis Eiswasser Kochsalz 3:1.

2.12.6 Der schwebende Eiswürfel

Material:

- ✓ Eiswürfel
- ✓ Zündholz
- ✓ Salz
- ✓ Becher

Aufbau und Durchführung:

Man legt den Eiswürfel auf den umgedrehten Becher und darauf das Zündholz. Nun streut man vorsichtig etwas Salz auf das Hölzchen und wartet ein wenig. Hebt man nun das Streichholz an, so hebt es den Eiswürfel mit in die Luft.

Erklärung:

Der Eiswürfel ist mit einer dünnen Schicht Wasser überzogen, die vom Schmelzen auf Grund der Umgebungstemperatur und des Umgebungsluftdrucks kommt. Das Salz auf dem Eiswürfel besteht aus einer Struktur von Natrium- und Chlorionen, die in der Wasserschicht aufgelöst wird. Die notwendige Energie um diese Strukturen aufzubrechen, wird der Umgebung, in diesem Fall dem Eiswürfel, entzogen wird. An der Oberfläche des Eiswürfels taut das Eis also leicht an und schließt beim erneuten Erstarren das Zündholz mit in das Eis ein.

2.12.7 Der geteilte Eisblock

Material:

- ✓ Großer Eisblock
- ✓ Dünne Drahtschlinge
- ✓ Gewichte
- ✓ 2 Tische
- ✓ Brett, Lineal oder ähnliches

Bild 69: Eine Drahtschlinge teilt einen Eisblock.

Aufbau und Durchführung:

Den Eisblock stellt man selbst her, indem man eine Milchpackung mit Wasser füllt und in das Gefrierfach legt. Die Verpackung lässt anschließend leicht entfernen.

Die Tische werden so nebeneinander aufgestellt, dass das Brett lange genug ist, um den entstandenen Spalt zu überbrücken. Der Eisblock wird auf das Brett gelegt. Nun legt man die Drahtschlinge um das Eis und das Brett. Am unteren Ende der Schlinge werden die Gewichte angebracht, sodass der Draht auf dem Eisblock stabilisiert ist. Mit etwas Geduld sieht man wie der Draht durch den Eisblock wandert, ohne ihn in zwei Teile zu zerteilen.

Erklärung:

Die Gewichtskraft der Gewichte verteilt sich auf die sehr kleine Auflagefläche der Drahtschlinge. Somit ist der Druck auf das Eis unter der Drahtauflagestelle sehr groß. Bei großem Druck ändert aber Eis seinen Aggregatzustand und verflüssigt sich auch bei niedrigerer Temperatur. Der Draht kann also in das Eis eindringen. Über dem Draht herrscht

aber nach wie vor der normale Luftdruck, der das Wasser über dem Draht wieder zum Gefrieren bringt. Der Draht kann also den Eiswürfel durchwandern, ohne ihn in zwei Teile zu zerteilen. Um diesen Versuch durchführen zu können, muss freilich die Umgebungstemperatur niedrig sein. Eine Möglichkeit besteht darin, den Versuch so zu adaptieren, dass er in einem Kühlschrank durchgeführt werden kann. Als Variante kann man auch einen dickeren Draht verwenden. Das Wasser hat dann die Möglichkeit abzufließen und kann nicht mehr frieren. Der Draht teilt also den Eisblock in zwei Teile.

2.12.8 Die Schmelzwärme von Wasser

Material:

- ✓ Brenner
- ✓ Glas
- ✓ Eiswürfel
- ✓ Kaltes Wasser
- ✓ Thermometer
- ✓ Stativ

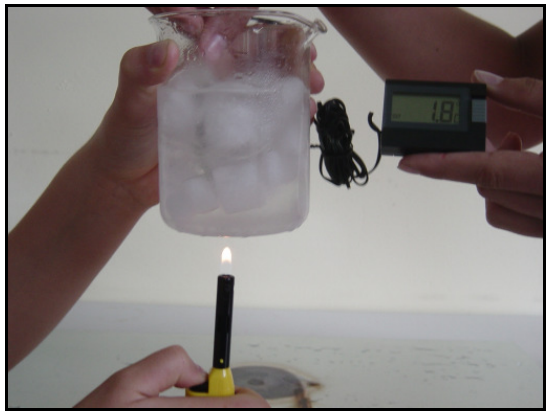

Bild 70: Schmelzwärme von Wasser.

Aufbau und Durchführung:

Das Glas wird mit Wasser und den Eiswürfeln gefüllt. Das Thermometer wird an dem Stativ befestigt und in das Eiswasser getaucht, die Temperaturanzeige müsste nahe bei 0ºC liegen. Mit dem Brenner wird nun das Wasser im Glas erwärmt. Die Temperatur steigt trotz der Wärmezufuhr nicht an.

Erklärung:

Die über den Brenner zugeführte Wärme wird nicht dazu verwendet, das Wasser zu erwärmen, sondern um das Eis im Eiswasser zu schmelzen. Ist die notwendige Schmelzwärme zugeführt und das gesamte Eis geschmolzen, wird die Wärme zur Temperaturerhöhung herangezogen.

2.13 Wichtige Gehilfen in der Thermodynamik: Kerzen

2.13.1 Physikalischer Hintergrund

Seit vielen Jahrhunderten gehören Kerzen zum täglichen Leben der Menschen auf der ganzen Welt. So einfach der Aufbau einer Kerze, die im Normalfall nur aus Wachs und einem Docht besteht ist, so interessant ist der Vorgang, der hinter der Verbrennung steht. Der Docht einer Kerze besteht aus einem saugfähigen Material, heute vielfach Baumwolle. Das Wachs wird heute vielfach durch Paraffin oder Stearin ersetzt. Paraffin ist ein Alkanegemisch, das aus Erdöl gewonnen wird, Stearin hingegen basiert auf tierischen und pflanzlichen Fetten. Die Funktionsweise ist in allen drei Fällen aber die Selbe und deshalb werden auch Kerzen ohne Wachs als Kerzen bezeichnet, obwohl das Wort Kerze vom lateinischen cereus abgeleitet wird, was so viel wie Wachslicht bedeutet.

Um eine Kerze zum brennen zu bringen braucht man etwas Energie, die den Verbrennungsprozess in Gang bringt. Die Flamme eines Streichholzes etwa schmilzt das feste Wachs der Kerze, das dann durch die Kapillarwirkung im flüssigen Zustand in den Docht gezogen wird. Wie auch das feste Wachs verbrennt auch das geschmolzene Wachs bei diesen Temperaturen nicht, sondern es beginnt am oberen Ende des Dochts zu verdampfen und geht in den gasförmigen Zustand über. Erst in diesem Zustand kommt es zur Verbrennung der Kohlenwasserstoffe der Kerze mit dem Sauerstoff der Luft. Der Kohlenstoff reagiert mit dem Sauerstoff der Luft und bildet Kohlendioxid und Kohlenmonoxid. Wasser in Form von Wasserdampf entsteht durch die Reaktion des Sauerstoffes der Luft mit den Wasserstoffatomen des Kerzenwachses. Die warmen Abfallprodukte der Verbrennung steigen nach oben hin auf, was die typische Form der Flamme erklärt. Durch Konvektion wird neuer Sauerstoff an den Docht herangebracht. Somit kann der Verbrennungsprozess weiter aufrechterhalten werden, solange genügend Brennstoff, also Kerzenwachs vorhanden ist. Die Sauerstoffzufuhr der Luft erfolgt aber nicht schnell genug um das gesamte in die Luft übertretende Gas sofort zu verbrennen. Es bilden sich kleine Kohlenstoffpartikel, die zu glühen beginnen und der Kerze die typische Färbung verleihen. Am oberen Ende der Flamme haben aber auch diese Partikel genügend Sauerstoff zur Verbrennung gefunden.

2.13.2 Eine Kerzenflamme hebt Wasser

Material:

- ✓ Schale mit Wasser
- ✓ Münze
- ✓ Kerze
- ✓ Glas

Bild 71: Eine Kerze unter einem Glas.

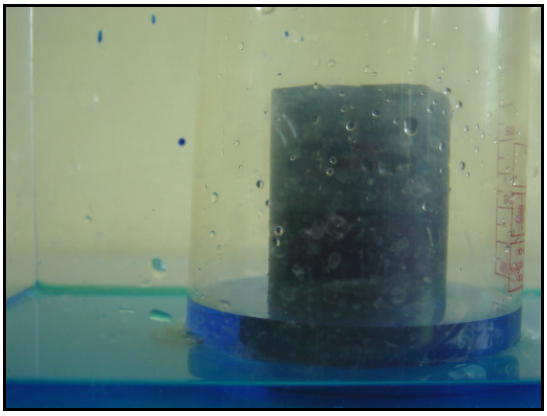

Bild 72: Erloschene Kerze unter einem Glas. Wasser wird in das Glas gezogen.

Aufbau und Durchführung:

Die Kerze wird am Boden der Wanne befestigt und angezündet. Nun füllt man den Boden der Wanne mit Wasser und stülpt das Glas über die Kerze. Die Münze muss so in die Schale gelegt werden, dass der Glasrand darauf liegt. Bald wird die Kerze erlöschen, man kann aber auch beobachten wie Wasser in das Glas gedrückt wird. Es ist eine deutliche Differenz des Wasserstandes innerhalb und außerhalb des Glases zu erkennen.

Erklärung:

Im Glas entsteht ein Unterdruck, sodass der höhere Luftdruck von außen das Wasser in das Glas drückt. Dafür können drei Vorgänge gefunden werden, die alle zu diesem Effekt beitragen.

1.) Die Luft um die Kerze ist wärmer als die Umluft. Stülpt man das Glas über die Kerze, wird also eher die warme Luft eingeschlossen. Nachdem die Kerze erloschen ist, fehlt die Heizung und die eingeschlossene Luft wird sich bald der Umgebungstemperatur anpassen. Nach dem Gesetz von Gay-Lussac fällt mit der Temperatur auch der Druck im Gas, der anfangs dem Umgebungsluftdruck entsprochen hat. Das Gas im Glas drückt also weniger auf die Flüssigkeit, als der Luftdruck der Umgebung, was zu einem Anstieg der Flüssigkeit im Glas führt, bis der Druckunterschied ausgeglichen ist. (siehe Versuch Nummer: 2.3.8.)
2.) Eines der Endprodukte beim Verbrennen einer Kerze ist Wasserdampf. Dieser kondensiert, nachdem das Gas im Glas abgekühlt ist, zu Wasser und fällt in die Wanne. Die Teilchenanzahl im Gas reduziert sich also, was nach der universellen Gasgleichung eine Abnahme der Temperatur und des Drucks mit sich bringt. Auch durch diesen Effekt entsteht ein Unterdruck, der durch Anstieg des Wasserspiegels ausgeglichen wird. Allerdings ist der Anteil an der gesamten Druckabnahme sehr gering und dieser Prozess ist eher von theoretischer Bedeutung.
3.) Ein weiteres Endprodukt der Verbrennung ist Kohlendioxid. Da Kohlendioxid leicht in Wasser löslich ist, gehen die CO_2- Moleküle in die Flüssigkeit über, was denselben Effekt wie beim Kondensieren des Wasserdampfes bewirkt. Die Teilchenanzahl im Gas verringert sich, der Druck fällt und der entstandene Unterdruck wird vom Druck der Umluft durch Anheben des Wasserspiegels ausgeglichen. Aber auch hier sollte die Bedeutung dieses Effektes nicht überschätzt werden.

Die Hauptverantwortung für die Druckabnahme liegt beim Abfall der Temperatur über der Flüssigkeit, wie in Punkt 1 beschrieben. Die weit verbreitete Erklärung für diesen Versuch, dass die eingeschlossene Luft durch die Verbrennung weniger Platz benötigt, ist also nicht richtig. Die Sauerstoffmoleküle der Luft verbrennen zwar, die Volumina der Endprodukte dieser Verbrennung unterscheiden sich im Wesentlichen aber nicht von jenen der Ausgangstoffe.

2.13.3 Beim Verbrennen einer Kerze entsteht Ruß

Material:

- ✓ Kerze
- ✓ Messer
- ✓ Streichholz oder Feuerzeug

Aufbau und Durchführung:

Die Kerze wird entzündet und das Messer wird mit der Spitze in die Flamme gehalten. Schon bald überzieht sicht die Messerspitze mit einer schwarzen Schicht aus Kohlenstoff.

Erklärung:

Beim Verbrennen einer Kerze schmilzt das Wachs und wird durch den Docht nach oben gezogen. Dort verdampft das Wachs und verbrennt mit dem Sauerstoff der Luft. Die Kohlenwasserstoffmoleküle des Wachses und der Sauerstoff der Luft erzeugen Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Wasser. Obwohl das bereits verbrannt Gas sofort aufsteigt, ist die Sauerstoffzufuhr der Luft nicht schnell genug um alle Wachsteilchen sofort vollständig zu verbrennen. Die noch nicht verbrannten Kohlenstoffe bilden kleine Russpartikel, die zu glühen beginnen und erst am oberen Ende der Flamme verbrennen. Die Messerspitze fängt aber die Partikel in der Flamme ab, bevor sie vollständig verbrannt sind.

2.13.4 Beim Verbrennen einer Kerze entsteht Wasser

Material:

- ✓ Kochtopf aus Aluminium
- ✓ Eiswürfel
- ✓ Kerze
- ✓ Streichholz oder Feuerzeug

Aufbau und Durchführung:

Die Eiswürfel werden in den Topf gegeben und der Topf damit abgekühlt. Nachdem der Topf kühl genug ist, wird er über, nicht in die Flamme der Kerze gehalten. Mit der Zeit kann man an der Unterseite des Topfes Kondenswasser beobachten.

Erklärung:

Im Docht der Kerze beginnt das flüssige Wachs zu verdampfen und kann so den Docht verlassen. Das Wachs besteht aus Kohlenwasserstoffen die nun mit dem Sauerstoff der Luft verbrennen können und neben Kohlenmonoxid und Kohlendioxid auch Wasserdampf erzeugen. Dieser steigt auf und trifft auf den Aluminiumkochtopf, der aber eine Temperatur unter jener besitzt, bei der Wasser gasförmig ist. Das Wasser kondensiert also am Topf und kann so sichtbar gemacht werden.

2.13.5 Tafelkreide als Docht

Material:

- ✓ Tafelkreide
- ✓ Feuerfeste Unterlage
- ✓ Petroleum
- ✓ Kleine Schale aus feuerfestem Material
- ✓ Feuerzeug
- ✓ Gefäß zum Überstülpen als Sicherheitsvorkehrung

Bild 73: Kreidekerze.

Aufbau und Durchführung:

Die Kreide wird in die Schale gestellt. Nun füllt man die Schale 1 cm hoch mit Petroleum. Die Kreide saugt sich mit dem Petroleum voll und wird anschließend auf die feuerfeste Unterlage gestellt. Nun kann man die Kreide wie eine Kerze entzünden.

Erklärung:

Dieses Experiment zeigt, dass eine Kerze nicht zwingend aus Wachs oder Parafin bestehen muss. Die Rolle des Dochtes übernimmt in diesem Fall die Kreide, die sich mit Petroleum voll saugt. Den Brennstoff liefert das Petroleum anstelle des Kerzenwachses.

2.13.6 Der brennbare Stoff einer Kerze

Material:

- ✓ Kerze
- ✓ Streichhölzer

Aufbau und Durchführung:

Ein brennendes Streichholz wird in die Nähe einer kurz zuvor ausgelöschten Kerze gebracht. Sobald die Flamme in den Bereich des aufsteigenden Rauches der Kerze gebracht wird, entzündet sich die Kerze auch einige Zentimeter über dem Docht wieder.

Erklärung:

Der brennbare Stoff einer Kerze ist weder das feste Wachs noch der Docht, sondern das verdampfte Wachs über dem Docht. Das feste Wachs schmilzt durch die Flamme und wird in den Docht gezogen. Durch die dort herrschende Temperatur verdampft es und erst in diesem Zustand kann es verbrennen. Das brennende Streichholz entzündet das noch vorhandene Gas über dem gelöschtem Docht und die Kerze kann die Verbrennung wieder aufnehmen.

3 Anhang

3.1 Literaturverzeichnis

Annalen der Physik 17; 1905.

Bergmann/Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik; 11. Auflage; Walter de Gruyter; 1998.

Brenig: Statistische Theorie der Wärme; 3. Auflage; Springer-Verlag; 1992.

Cerbe/Hoffmann: Einführung in die Thermodynamik; 12. Auflage; Carl Hanser Verlag; 1999.

Dietzel: Technische Wärmelehre; 1. Auflage; Vogel-Verlag; 1976.

Dransfeld/Kienle/Kalvius: Physik 1; 9. Auflage; Oldenburg Wissenschaftsverlag; 2001.

Hahn: Physikalische Freihandexperimente Band 1; Verlag Otto Salle Berlin; 1905.

Heyder: Die Stellung des Freihandversuchs im System der Experimente des Physikunterrichts und seine Bedeutung für die Entwicklung des Erkenntnisvermögens der Schüler; Dissertation am Pädagogischen Institut Güstrow der Universität Rostock; 1967.

Kuchling: Taschenbuch der Physik; 17. Auflage; Carl Hanser Verlag; 2001.

Müller: Grundzüge der Thermodynamik; 2. Auflage; Springer; 1999.

Rentzsch: Experimente mit Spaß- Wärme; 1. Auflage; Verlag Hölder-Pichler-Tempsky; 1995.

Tipler: Physik; 1. Auflage; Spektrum Lehrbuch; 1994.

Wagner: Wärmeübertragung; 3. Auflage; Vogl Fachbuch; 1991.

3.2 Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Schwankung des Spiegels eines hochempfindlichen Galvanometers infolge der ungeordneten Bewegung der Luftmoleküle. 12
Bild 2: Zuckerwürfel in kaltem (rechts) und warmem (links) Wasser. 12
Bild 3: Tee mit kaltem Wasser übergossen (links) und Tee mit warmen Wasser übergossen (rechts). 13
Bild 4: Die Teegläser aus Bild 1, nach 5 Stunden Wartezeit. 14
Bild 5: Münze nach der Erwärmung. 17
Bild 6: Die länger werdende Stricknadel. 18
Bild 7: Bimetallstreifen. 20
Bild 8: Die länger werdende Gitarrensaite. 21
Bild 9: (V, T)-, (p, T)-, (p, V)-Diagramme an verdünnten Gasen. Die jeweils dritte Zustandsvariable p, V, T wird konstant gehalten. 24
Bild 10: Münzventil. 26
Bild 11: Erwärmte Plastikflasche nach der Abkühlung in kaltem Wasser. 27
Bild 12: Der neugierige Luftballon vor der Erwärmung. 28
Bild 13: Der neugierige Luftballon nach der Wärmezufuhr. 29
Bild 14: Der schüchterne Luftballon vor der Abkühlung. 29
Bild 15: Der schüchterne Luftballon nach der Abkühlung. 30
Bild 16: Erwärmung der in einem Kolben eingeschlossenen Luft. 32
Bild 17: Abkühlung der eingeschlossenen Restluft aus dem vorherigen Bild. (Wasser wurde zur besseren Demonstration mit Tinte gefärbt). 32
Bild 18: Erwärmung einer Dose über dem Brenner. 34
Bild 19: Die implodierte Dose. 34
Bild 20: Ein Glasröhrchen als Thermometer. 35
Bild 21: Die Entropie eines Gummistabes als Funktion der Deformation λ. 38
Bild 22: Gedehnter Gummi. 39
Bild 23: Gedehnter Gummi unter Einwirkung eines Wärmestroms. 39
Bild 24: Mit Wasser gefüllter Papierbecher über einer Flamme. 43
Bild 25: Mit Wasser gefüllter Luftballon über einer Kerze. 44
Bild 26: Russflecken auf dem Luftballon. 44
Bild 27: Schacht in einer Kerze. 46
Bild 28: In der Natur vorkommende Phasen. 47
Bild 29: Änderung des Aggregatzustandes bei Zuführung eines konstanten Wärmestromes (schematische Darstellung). 48
Bild 30: p-T Diagramm von Kohlendioxid. 49
Bild 31: p-T Diagramm von Wasser. 50
Bild 32: In Spiritus getauchte Watte am Sensor eines Thermometers. 50
Bild 33: In Spiritus getauchte Watte am Sensor eines Thermometers nach 10 Minuten Wartezeit. 51
Bild 34: Eine Spritze als Wasserkocher. 52
Bild 35: Unterschiedliche Verdunstungsgeschwindigkeit von Wasser (links) und Spiritus (rechts). 53
Bild 36: Unterschiedliche Verdunstungsgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Temperatur. 54
Bild 37: Unterschiedliche Verdunstungsgeschwindigkeit bei Einwirkung einer Luftströmung. 55
Bild 38: Erwärmung von Wasser in einem Kolben. 58
Bild 39: Wärmepad beim Erstarren. 59
Bild 40: Wärmeleitung auf einer Metallplatte. 62

Bild 41: Wärmeleitung auf einem mit Wachskügelchen bestückten Draht. 63
Bild 42: Wärmeleitung auf Drähten aus gleichem Material. Der Draht links hat aber den dreifachen Durchmesser. 64
Bild 43: Drähte mit Wachskügelchen bestückt. Silberdraht (oben), Messingdraht (mitte) und Kupferdraht (unten). 65
Bild 44: Wärmeleitung einer Münze in einem Taschentuch. 66
Bild 45: Eine Flamme unter einem Drahtnetz. 67
Bild 46: Bauweise eines Einfachfensters. 70
Bild 47: Bauweise eines Doppelfensters. 70
Bild 48: Schachtelkamin. 71
Bild 49: Flaschenvulkan mit warmem Wasser (violett) und kaltem Wasser (orange). 72
Bild 50: Flaschenvulkan mit warmem Wasser (violett) und kaltem Wasser (orange). 73
Bild 51: Unterschiedliche Abkühlzeit bei größerer Oberfläche (rechts) und kleinerer Oberfläche (links). 74
Bild 52: Laufrad über einer Kerze. 75
Bild 53: Entzündung eines leeren Teebeutels. 76
Bild 54: Wasserkreislauf mittels Konvektion. 77
Bild 55: Energieverteilung der schwarzen Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge. 81
Bild 56: Wärmehaushalt der menschlichen Haut. 81
Bild 57: Flasche mit Münzventil unter Wärmestrahlung. 82
Bild 58: Reflexion der Wärmestrahlung auf Alufolie. 83
Bild 59: Reflexion der Wärmestrahlung auf schwarzer Oberfläche. 84
Bild 60: Biegen eines Metallkleiderbügels. 87
Bild 61: Salz- und Pfeffergemisch. 91
Bild 62: Das Ergebnis KKZZ bei einem Münzwurf. 92
Bild 63: Binomialverteilung mit B(4; 1/2). 93
Bild 64: Änderung der Temperatur (a) und des Volumens (b) von Eis, Wasser und Wasserdampf bei Zuführung eines zeitlich konstanten Wärmestromes. 94
Bild 65: Luftballons in Wanne. Im Vergleich zu Wasser in der Wanne, ist der rote Ballon mit wärmen, der orange mit kälteren Wasser gefüllt. 95
Bild 66: Das Verhalten von Wasser bei niedriger Temperatur. 96
Bild 67: Wasser hat im gefrorenen Zustand ein größeres Volumen. 97
Bild 68: Eiswasser mit Kochsalz gemischt. Die Temperatur liegt unter 0ºC. 98
Bild 69: Eine Drahtschlinge teilt einen Eisblock. 100
Bild 70: Schmelzwärme von Wasser. 101
Bild 71: Eine Kerze unter einem Glas. 104
Bild 72: Erloschene Kerze unter einem Glas. Wasser wird in das Glas gezogen. 104
Bild 73: Kreidekerze. 107

Quellen:

Bild 1, Bild 30, Bild 64: Dransfeld/Kienle/Kalvius: Physik 1; 9. Auflage; Oldenburg Wissenschaftsverlag; 2001.

Bild 21: Müller: Grundzüge der Thermodynamik; 2. Auflage; Springer; 1999.

Bild 28: Brenig: Statistische Theorie der Wärme; 3. Auflage; Springer-Verlag; 1992.

Bild 31: Kuchling: Taschenbuch der Physik; 17. Auflage; Carl Hanser Verlag; 2001.

Bild 55: Wagner: Wärmeübertragung; 3. Auflage; Vogl Fachbuch; 1991.

Alle anderen Bilder: Eigene.