

# Physikalische Schulversuche

8

## Wärmelehre



---

# Physikalische Schulversuche

---

Achter Teil  
Wärmelehre

Herausgegeben von Georg Schollmeyer

7. Auflage



Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin · 1981

Verfaßt bzw. bearbeitet von

Dr. Erich Albrecht (2.0.1., 2.1.)

Dr. Kurt Glaitzar (1.0.1., 1.0.2., 1.1., 1.2.)

Siegfried Hebecker (3.0.1. bis 3.0.3., 3.1. bis 3.3.)

Margrit Ludwig (2.0.2., 2.2., 2.3.1. bis 2.3.3., 2.3.4. \*, 2.3.5., 2.3.6. \*, 2.3.7. \*)

Gerhard Priesnitz (4.0.1., 4.0.2., 4.1., 4.2.)

Dr. Winfried Rössler (3.0.4., 3.4.)

Georg Schikora (4.0.3., 4.3., 5.0., 5.1., 5.2.)

Dr. Georg Schollmeyer (1.0.3., 1.3., 2.0.3., 2.3.4. \*, 2.3.6. \*, 2.3.7. \*)

Versuche, die von mehreren Autoren verfaßt wurden, sind mit einem \* gekennzeichnet.

Neufassung der Ausgabe von 1961 — herausgegeben von Georg Sprockhoff — verfaßt von Werner Bindseil, Wolfgang Brunstein, Josef Fischer, Gerhard Heise, Heinrich Paucker, Georg Sprockhoff und Dr. Ernst Schneider

Redaktion: Willi Wörstenfeld

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin 1978

Die 1. bis 5. Auflage erschienen unter den Titel-Nummern 02030 und 022112

Lizenz-Nr. 203 · 1000/80 (DN 022148-2)

LSV 0645

Einband: Manfred Behrendt

Zeichnungen: Kurt Dornbusch, Waltraut Schmidt

Typografie: Atelier vvw

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“, 582 Bad Langensalza

Schrift: 9/10 Extended Monotype

Redaktionsschluß: 1. Juli 1980

Bestell-Nr. 707 165 8

DDR 9,20 M

# Inhalt

Einleitung . . . . .	9
<b>1. Temperatur und Wärmemenge . . . . .</b>	<b>13</b>
1.0. Methodische Bemerkungen . . . . .	13
1.1. Die Temperatur . . . . .	15
1.1.2 Sinnestäuschung beim subjektiven Beurteilen von Temperaturen . .	15
1.1.2. Thermometermodell mit Wasserfüllung . . . . .	16
1.1.3. Thermometermodell für Ableseübungen . . . . .	17
1.1.4. Markieren der Fixpunkte bei Thermometern . . . . .	18
1.1.5. Nachprüfen der Fixpunkte an einem Thermometer . . . . .	20
1.1.6. Feststellen von Höchst- und Tiefsttemperaturen . . . . .	21
1.1.7. Elektrische Temperaturmessungen mit einem behelfsmäßigen Ther- moelement . . . . .	22
1.1.8. Elektrische Temperaturmessungen mit einem Thermistor . . . . .	23
1.2. Umwandlung verschiedener Energiearten in Wärmeenergie — Wärme- quellen . . . . .	25
1.2.1. Umwandlung mechanischer Energie in Wärmeenergie durch Reibung .	25
1.2.2. Umwandlung elektrischer Energie in Wärmeenergie mit Hilfe einer Stativheizplatte . . . . .	27
1.2.3. Umwandlung chemischer Energie in Wärmeenergie durch Verbren- nung . . . . .	28
1.3. Wärmemenge — Wärmekapazität . . . . .	29
1.3.1. Experimente zur Herleitung der Gleichung für die Wärmemenge . .	29
1.3.2. Experimente zur Einführung der spezifischen Wärmekapazität . . .	34
1.3.3. Experimente mit dem Langbrenner . . . . .	37
1.3.4. Spezifische Wärmekapazität fester Stoffe . . . . .	41
1.3.5. Spezifische Wärmekapazität flüssiger Stoffe . . . . .	42
1.3.6. Wärmekapazität eines Dewar-Gefäßes. . . . .	43
1.3.7. Wärmekapazität eines Kalorimetergefäßes aus Metall oder Glas . . .	45
1.3.8. Mischungstemperatur zweier verschieden temperierter Wassermen- gen. . . . .	46

<b>2.</b>	<b>Volumenänderung der Körper bei Temperaturänderung</b>	<b>48</b>
2.0.	Methodische Bemerkungen	48
2.1.	Volumenänderung fester Körper	50
2.1.1.	Volumenänderung von Metallen	50
2.1.2.	Volumenänderung von Nichtmetallen	52
2.1.3.	Kraftwirkung bei der Volumenänderung eines Körpers	55
2.1.4.	Verformung eines Bimetallstreifens	57
2.1.5.	Elektrische Kontaktgabe durch einen Bimetallstreifen	58
2.1.6.	Modellversuch zur Temperaturregelung	59
2.1.7.	Experiment mit dem Gerät zur Demonstration der Ausdehnung der Körper	60
2.1.8.	Messung der Längenänderung von Metallen und Glas	61
2.2.	Volumenänderung flüssiger Körper	62
2.2.1.	Volumenänderung des Wassers oder anderer Flüssigkeiten beim Erwärmen	62
2.2.2.	Vergleich der Ausdehnung verschiedener Flüssigkeiten beim Erwärmen	63
2.2.3.	Volumenänderung des Wassers im Temperaturbereich von 0 °C bis 10 °C — Die Anomalie des Wassers	64
2.2.4.	Temperaturschichtung des Wassers bei Temperaturen zwischen 0 °C und 4 °C	65
2.2.5.	Bestimmung der kubischen Ausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten mit Hilfe eines Meßkolbens	66
2.3.	Volumen- und Druckänderung gasförmiger Körper	68
2.3.1.	Volumenänderung von Luft beim Erwärmen	68
2.3.2.	Qualitativer Nachweis des Zusammenhangs zwischen Druck, Volumen und Temperatur eines Gases mit Hilfe eines Luftballons	70
2.3.3.	Nachweis des Zusammenhangs zwischen Druck, Volumen und Temperatur eines Gases mit Hilfe eines Manometers	70
2.3.4.	Experimente zur Herleitung bzw. Bestätigung der Zustandsgleichung des idealen Gases und ihrer Sonderfälle mit dem $p$ - $V$ - $T$ -Gerät	71
2.3.5.	Modellexperimente zur Zustandsgleichung und zu ihren Sonderfällen mit dem Gerät zur kinetischen Gastheorie	77
2.3.6.	Bestätigung der Gleichung für isobare Zustandsänderungen eines Gases — Ermittlung des Ausdehnungskoeffizienten	79
2.3.7.	Bestätigung der Gleichung für isochore Zustandsänderungen eines Gases — Ermittlung des Spannungskoeffizienten	83
<b>3.</b>	<b>Änderung der Aggregatzustände</b>	<b>86</b>
3.0.	Methodische Bemerkungen	86
3.1.	Schmelzen und Erstarren	87
3.1.1.	Schmelz- und Erstarrungstemperatur von Natriumthiosulfat oder Natriumazetat	87

3.1.2.	Schmelz- und Erstarrungstemperatur von Stearin . . . . .	88
3.1.3.	Vergleich der Schmelztemperatur verschiedener Stoffe mit der ihrer Legierungen . . . . .	90
3.1.4.	Aufnahme von Wärmeenergie beim Schmelzen von Eis . . . . .	91
3.1.5.	Bestimmung der spezifischen Schmelzwärme des Eises . . . . .	93
3.1.6.	Volumenzunahme des Wassers beim Erstarren . . . . .	96
3.1.7.	Zersprengen einer Gefrierbombe . . . . .	98
3.1.8.	Volumenabnahme des Stearins beim Erstarren . . . . .	99
3.1.9.	Modellexperiment zum Gießen . . . . .	99
<b>3.2.</b>	<b>Sublimieren . . . . .</b>	<b>100</b>
3.2.1.	Sublimation von Ammoniumchlorid, Kampfer und Naphtalin . . . . .	100
3.2.2.	Erzeugen von Kohlendioxidschnee . . . . .	101
3.2.3.	Versuche mit Kohlendioxidschnee . . . . .	102
<b>3.3.</b>	<b>Lösen und Kristallisieren . . . . .</b>	<b>104</b>
3.3.1.	Nachweis der Lösungswärme . . . . .	104
3.3.2.	Kristallisationswärme von Natriumthiosulfat oder Natriumazetat — Unterkühlen . . . . .	106
3.3.3.	Herstellen von Kältemischungen . . . . .	108
3.3.4.	Regelation des Eises . . . . .	109
<b>3.4.</b>	<b>Verdampfen und Kondensieren . . . . .</b>	<b>110</b>
3.4.1.	Erwärmen von Wasser bis zum Sieden . . . . .	110
3.4.2.	Bestimmen der Siedetemperatur verschiedener Flüssigkeiten . . . . .	111
3.4.3.	Kondensieren . . . . .	112
3.4.4.	Destillieren . . . . .	113
3.4.5.	Modellexperiment zum Wärmeaustauscher . . . . .	115
3.4.6.	Verdunsten . . . . .	116
3.4.7.	Wärmeaufnahme beim Verdunsten . . . . .	118
3.4.8.	Spezifische Verdampfungswärme von Wasser . . . . .	120
3.4.9.	Spezifische Kondensationswärme von Wasser . . . . .	122
3.4.10.	Temperaturverlauf beim Erwärmen des Wassers bis zum Sieden . . . . .	124
3.4.11.	Sieden unter vermindertem Druck . . . . .	125
3.4.12.	Sieden unter erhöhtem Druck . . . . .	128
3.4.13.	Zerspringen einer Knallkugel . . . . .	129
3.4.14.	Erzeugen überhitzten Dampfes . . . . .	130
3.4.15.	Modellexperimente zum Verdunsten, Sieden und Destillieren mit dem Gerät zur kinetischen Gastheorie . . . . .	131
<b>4.</b>	<b>Wärmeausbreitung . . . . .</b>	<b>134</b>
<b>4.0.</b>	<b>Methodische Bemerkungen . . . . .</b>	<b>134</b>
<b>4.1.</b>	<b>Wärmeleitung . . . . .</b>	<b>135</b>
4.1.1.	Versuche zur Einführung in die Wärmeleitung . . . . .	135
4.1.2.	Nachweis der unterschiedlichen Leitfähigkeit verschiedener fester Stoffe mit dem Gerät zur Demonstration der Wärmeleitfähigkeit . . . . .	136

## ● Inhalt

4.1.3.	Wärmeleitfähigkeit des Wassers . . . . .	138
4.1.4.	Wärmeleitfähigkeit der Luft . . . . .	139
4.2.	<b>Wärmeströmung</b> . . . . .	140
4.2.1.	Übergang von der Wärmeleitung zur Wärmeströmung . . . . .	140
4.2.2.	Sieden von Wasser in einer Papiertüte . . . . .	141
4.2.3.	Wärmeströmung in einer Zirkulationsröhre . . . . .	142
4.2.4.	Wärmeströmung an einem Türspalt . . . . .	143
4.2.5.	Luftströmung über Wärmequellen . . . . .	143
4.2.6.	Wärmeströmung der Luft im geheizten Zimmer . . . . .	144
4.2.7.	Schornsteinmodell . . . . .	146
4.3.	<b>Wärmestrahlung</b> . . . . .	146
4.3.1.	Reflexion der Wärmestrahlung an Metallspiegeln . . . . .	146
4.3.2.	Absorptionsvermögen schwarzer Körper für Wärmestrahlung . . . . .	148
4.3.3.	Experimente mit dem Wärmestrahlungsgerät . . . . .	149
4.3.4.	Experimente mit dem Radiometer . . . . .	150
5.	<b>Wärmeenergie</b> . . . . .	152
5.0.	<b>Methodische Bemerkungen</b> . . . . .	152
5.1.	<b>Zusammenhang zwischen Wärmeenergie und anderen Energiearten</b> . . . . .	152
5.1.1.	Umwandlung mechanischer Energie in Wärmeenergie mit dem pneumatischen Feuerzeug . . . . .	152
5.1.2.	Umwandlung mechanischer Energie in Wärmeenergie mit der Whittingschen Röhre . . . . .	154
5.1.3.	Experiment zur Bestätigung des 1. Hauptsatzes der Wärmelehre . . . . .	155
5.1.4.	Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie . . . . .	157
5.2.	<b>Wärmekraftmaschinen</b> . . . . .	158
5.2.1.	Modellexperiment zur atmosphärischen Dampfmaschine . . . . .	158
5.2.2.	Modellexperiment zur Dampfturbine . . . . .	160
5.2.3.	Modellexperiment zum Verbrennungsmotor . . . . .	162
Register	. . . . .	164

## Einleitung

1. Im 8. Teil der „Physikalischen Schulversuche“ werden Unterrichtsmittel und Experimente beschrieben, die bei der unterrichtlichen Behandlung der Wärmelehre eingesetzt werden können. Dabei steht die makrophysikalische Betrachtungsweise im Vordergrund. Nur wenige Experimente, und zwar ausschließlich Modellexperimente mit dem Gerät zur kinetischen Gastheorie, befassen sich mit der Erörterung mikrophysikalischer Vorgänge. Eine Fülle von Anregungen zur experimentellen Behandlung mikrophysikalischer Vorgänge innerhalb der Wärmelehre bietet dem Lehrer der 11. Teil der „Physikalischen Schulversuche“.

2. Auch im vorliegenden Teil wurden die bewährten methodischen und experimentellen Gesichtspunkte beibehalten, nach denen das Gesamtwerk „Physikalische Schulversuche“ konzipiert worden ist.

Mit diesem Buch wird ein Beitrag zur Förderung der methodischen und experimentellen Kenntnisse und Fertigkeiten des Lehrers beabsichtigt. Entsprechende physikalische Kenntnisse des Benutzers müssen vorausgesetzt werden.

Das Buch berücksichtigt alle Versuche, die für die Behandlung der Wärmelehre in der allgemeinbildenden polytechnischen Oberschule notwendig sind. Dabei ist das Angebot an Versuchen so gestaltet, daß der Lehrer im allgemeinen eine Auswahl treffen kann, die seiner methodischen Konzeption entspricht. Die Reihenfolge der Kapitel und Abschnitte des Buches ist deshalb auch nicht von unterrichtsmethodischen, sondern von fachsystematischen Gesichtspunkten aus bestimmt.

Viele der angeführten Versuche können außerhalb des obligatorischen Physikunterrichts in Arbeitsgemeinschaften oder im fakultativen Unterricht eingesetzt werden.

Auch die Lehrer, die im polytechnischen Unterricht oder in der Berufsausbildung tätig sind, werden für ihre Arbeit durch dieses Buch Anregungen erhalten können.

3. In den methodischen Bemerkungen zu jedem Kapitel werden zunächst spezielle Hinweise zu den jeweils benötigten Geräten und allgemeine methodische Hinweise für die Behandlung des Stoffes dieses Kapitels gegeben. Die Versuchsbeschreibungen sind so angelegt, daß die Versuche mit Demonstrationsgeräten verschiedener Ausführungen und mit Schülerexperimentiergeräten durchgeführt werden können. Manche Versuchsbeschreibungen sind an ein bestimmtes Gerät gebunden, z. B. an das  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät oder an das Wärmestrahlungsgerät. Aber auch in diesen Fällen sind die Ausführungen auf andere Geräte, z. B. im Selbstbau hergestellte, übertragbar. Bei industriell gefertigten Geräten sollte der Lehrer auf Bedienungsanleitungen zurückgreifen und daraus spezielle Daten und Betriebsvorschriften entnehmen.

Die gute Ausstattung der Schulen mit industriell gefertigten Experimentiergeräten ermöglichte es, gegenüber früheren Ausgaben die Anzahl der für den Selbstbau empfohlenen Geräte stark zu reduzieren. Jedoch wurden, wie in allen Büchern dieser Reihe, Selbstbauanleitungen für einzelne kleine Hilfsmittel oder Versuchsgeräte aufgenommen. Diese ermöglichen es, die Versuche mit industriell gefertigten Unterrichtsmitteln durch Varianten zu bereichern sowie Lehrern und Schülern Anregungen für Hausexperimente und für die Tätigkeit in Arbeitsgemeinschaften und im fakultativen Unterricht zu geben.

4. Die folgende Zusammenstellung von Hinweisen zur Gestaltung des Buches soll dem Leser die Benutzung erleichtern.
  - Das Buch ist in fünf Kapitel gegliedert, jedes Kapitel in Abschnitte, jeder Abschnitt in Versuchsbeschreibungen.
  - Jedes Kapitel wird durch „Methodische Bemerkungen“ eingeleitet. Sie verallgemeinern methodische Gesichtspunkte der einzelnen Abschnitte, die nicht in den „Methodischen Hinweisen“ bei den Versuchsbeschreibungen erfaßt werden können. Methodische Bemerkungen sind mit 1.0., 2.0. usw. numeriert. Durch die Ziffer 0 an der dritten Stelle sind die allgemeinen Hinweise zur Einführung in das Kapitel sowie zu bestimmten Unterrichtsmitteln kenntlich gemacht (z. B. 3.0.0.). Die Ziffern an der dritten Stelle weisen auf die Abschnitte der Versuchsbeschreibungen hin, z. B. gehört 4.0.2. zum Abschnitt 4.2.
  - Jeder Abschnitt ist durch die Ziffer der Kapitelnummer und eine eigene Ziffer zweistellig gekennzeichnet, z. B. ist 2.3. der 3. Abschnitt des 2. Kapitels. Für die einzelnen Versuchsbeschreibungen tritt eine weitere Ziffer an die dritte Stelle, z. B. ist 2.3.7. der 7. Versuch im 3. Abschnitt des 2. Kapitels. Diese Ziffern werden auch bei den zugehörigen Abbildungen verwendet, wobei hinter einem Schrägstrich die laufende Nummer der Abbildung angehängt wird, z. B. ist 2.3.7./2 die 2. Abbildung zum Versuch 2.3.7.
  - Teilversuche mit gleicher Zielsetzung unter Verwendung anderer Mittel sind als *Variante a*, *Variante b* usw. bezeichnet. Teilversuche einer Versuchsreihe und Teilversuche mit unterschiedlicher Zielsetzung sind als *Versuch 1*, *Versuch 2* usw. bezeichnet.
  - Die Abkürzung [SE] hinter der Versuchsüberschrift sagt aus, daß dieser Versuch auch als Schülerexperiment oder Praktikumsversuch geeignet ist.
  - Die Marken neben den Versuchsüberschriften weisen auf besondere Gefahren hin und sollen zur Vorsicht mahnen.
  - Jede Versuchsbeschreibung beginnt mit einer Stückliste der verwendeten Geräte. Dabei sind solche Teile, die in jeder Physiksammlung in ausreichender Anzahl vorhanden sind oder die bei Verwendung anderer Geräte variiert werden müssen, nicht aufgeführt. Dazu gehören Teile des Stativmaterials, Verbindungsleiter, Schalter, Grundbretter der SEG und ähnliches.
  - Wo erforderlich sind die Nummern der Stückliste zur Verbesserung der Übersicht in die Abbildungen eingesetzt.
  - Selbstbauteile sind durch © kenntlich gemacht.
  - Abmessungen in Zeichnungen sind in Millimetern angegeben.
  - Die angegebenen Meßwertreihen sind bei der Versuchsprobe aufgenommen worden. Sie geben Richtwerte für die Größenordnung und die erzielbare Genauigkeit der Ergebnisse. Es ist unwahrscheinlich, daß bei einer Wiederholung der Versuche genau die gleichen Werte erreicht werden.
  - Bemerkungen im Anschluß an die Versuchsbeschreibungen geben Hinweise

zu Varianten und Erweiterungsmöglichkeiten der Versuche und zur Beachtung spezieller Gesichtspunkte für die erfolgreiche Versuchsdurchführung.

5. Eine wesentliche Voraussetzung für die experimentelle Behandlung der Wärmelehre ist das Bereitstellen zweckmäßiger *Wärmequellen*. Für Schulen, die an Stadtgasleitungen angeschlossen sind, ist der Bunsenbrenner für viele Demonstrationsversuche geeignet. Am zweckmäßigsten sind Bunsenbrenner mit einer Sparflamme. Neben dem Bunsenbrenner ist auch ein Teclubrenner sehr brauchbar. Für Schülerexperimente wird der Einsatz von Bunsenbrennern nicht empfohlen.

In Schulen, die nicht mit Stadtgas versorgt sind, sollte als Ersatz Propangas verwendet werden.

Propan ist ein „Flüssiggas“ mit sehr hohem Heizwert. Es wird in Flaschen von 1 kg, 3 kg, 5 kg, 10 kg und 14 kg geliefert. Für den Unterricht sind 5 kg-Flaschen besonders geeignet. Das Füllen erfolgt durch bestimmte Tankstellen. Die leeren Flaschen können durch die Post an die Füllstellen geschickt werden.

Propan ist ungiftig und bei richtigem Gebrauch nicht gefährlicher als Stadtgas. Der Lehrer muß aber gewisse Sicherheitsvorschriften beachten:

- Im Unterrichtsraum darf jeweils nur eine gefüllte Flasche vorhanden sein. Die Reserveflasche darf nicht in der Nähe von Öfen oder an Kellerfenstern aufbewahrt werden.
- Da Propan in der Flasche flüssig ist und eine höhere Dichte als Luft hat, darf die Gasentnahme nur bei stehender Flasche erfolgen.
- Jede Flasche muß mit einem Reduzierventil ausgestattet sein.
- Der Überdruck des ausströmenden Propangases im Vergleich zum Luftdruck ist etwa viermal so groß wie der vom Stadtgas. Deshalb ist es nicht zulässig, Bunsenbrenner für Stadtgas zu verwenden. Man benötigt Propangasbrenner, die feinere Düsen besitzen.
- Die Arbeitsschutzanordnung schreibt vor, daß alle Propangas-Anlagen in geschlossenen Räumen fest installiert und amtlich zugelassen werden müssen. Auskunft geben die Füllstellen.
- Die Zuleitung vom Anschlußhahn auf dem Experimentiertisch zum Brenner muß durch Propan-Druckschläuche erfolgen. Die Schläuche sind an den Anschlußstellen durch Schellen zu sichern.
- Beim Abstellen muß zuerst das Ventil an der Flasche, dann erst das am Brenner geschlossen werden.

Für Schülerexperimente reichen Spirituslampen aus Glas bei vielen Versuchen aus. Man muß nur durch eine genügende Anzahl von Holzunterlagen dafür sorgen, daß sie in verschiedenen Höhenlagen benutzt werden können. Da jedes Nachfüllen einer Spirituslampe kurz nach ihrem Verlöschen äußerst gefährlich ist, muß der Lehrer vor jeder Stunde mit Schülerexperimenten alle Lampen ausreichend füllen.

Anstelle der genannten Wärmequellen können auch elektrische Wärmequellen benutzt werden. In diesem Buch wird ihre Verwendung bevorzugt empfohlen. Es handelt sich um die Stativheizplatte und den elektrischen Tauchsieder. Bei der Verwendung des letzteren muß man darauf achten, daß der die Heizwendel enthaltende Teil während des Heizvorganges immer vollständig von der Flüssigkeit umgeben ist, da sonst der Heizdraht infolge Überhitzung durchschmelzen kann.

Man achte darauf, daß die von den Schülern benutzten elektrischen Wärmege-  
räte in jeder Hinsicht technisch einwandfrei sind.

6. Die Wärmelehre ist ein Teilgebiet der Physik mit langer Tradition, die sich zum Teil in den gebräuchlichen Begriffen wie Wärmemenge, spezifische Wärme, linearer Ausdehnungskoeffizient und anderen widerspiegelt. Soweit es notwendig und möglich war, wurden einige dieser Begriffe, die in der vorangegangenen Auflage noch enthalten waren, durch die in der neueren Fachliteratur üblichen ersetzt, z. B. spezifische Wärme durch spezifische Wärmekapazität.

Auch die Symbole (Formelzeichen) für die physikalischen Größen, die in der Wärmelehre auftreten, werden in der Literatur unterschiedlich benutzt. So werden für die Prozeßgröße Wärmemenge sowohl  $W_w$  als auch  $Q$  und für die Zustandsgröße innere Energie  $W_1$  als auch  $U$  gebraucht. In der vorliegenden Ausgabe wird zum Beispiel der 1. Hauptsatz der Wärmelehre in der Form

$$W_w = \Delta W_1 + W_m$$

geschrieben. Gegebenenfalls muß der Leser die dabei verwendeten Symbole durch entsprechende ersetzen.

Gemäß dem Internationalen Einheitensystem (SI) wird für die *Wärmemenge* die Einheit *Joule* (J), für die *Temperaturdifferenz* die Einheit *Kelvin* (K), für die *Wärmekapazität* die Einheit *Joule je Kelvin* (J/K) und für die *spezifische Wärmekapazität* die Einheit *Joule je Kilogramm und Kelvin*  $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)$  bzw. *Joule je Gramm und Kelvin*  $\left(\frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}}\right)$  verwendet.

Die Angabe des *Druckes* erfolgt in *Torr* und in *Kilopascal* (kPa), da zur Zeit noch beide Einheiten zugelassen sind.

7. Bei der Darstellung von Meßverfahren und bei Berechnungen, in die die experimentell ermittelten Werte eingehen, wurde nach den Regeln der Fehlerrechnung verfahren, d. h., es wurde unter Berücksichtigung der Fehlerschranken gerundet.

Jedoch mußten auch Ausnahmen zugelassen werden, für die methodische Gründe sprechen. Zum Beispiel sollte man bei der Arbeit mit dem  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät zur

Bildung der Quotienten  $\frac{V}{T}$  gerundete Werte für die Temperatur  $T$  verwenden.

Für die grafische Darstellung der Funktion  $V = f(T)$  im untersuchten Bereich oder für die Berechnung des Ausdehnungskoeffizienten jedoch wird man die Temperaturen bzw. die Temperaturdifferenzen in Bruchteilen von Kelvin angeben müssen.

Der Lehrer muß sich also je nach der gegebenen Situation überlegen, wie zu verfahren ist. Er sollte die Schüler mit wesentlichen Überlegungen zu Rundungsproblemen vertraut machen, damit sie sich früh daran gewöhnen, physikalisch sinnlose Stellen nicht anzugeben, andererseits aber auch einsehen, warum in einem Fall gerundet wird, im anderen nicht.

8. Abschließend sei ausdrücklich auf die Gefahren beim Umgang mit elektrischen Spannungen und Giften wie Quecksilber hingewiesen. Es ist auf die strengste Einhaltung der „Richtlinie für den Arbeits- und Brandschutz im naturwissenschaftlichen Unterricht und in der außerunterrichtlichen Arbeit auf dem Gebiet der Naturwissenschaften“ vom 25. Mai 1967 zu achten.

# 1. Temperatur und Wärmemenge

## 1.0. Methodische Bemerkungen

1.0.0. Im ersten Kapitel werden Experimente dargestellt, mit deren Hilfe den Schülern der Zugang zu den grundlegenden Begriffen Temperatur und Wärmemenge erleichtert werden kann. Weiterhin werden Versuche angeboten, die die Umwandlung verschiedener Energien in Wärmeenergie durch physikalische und chemische Prozesse zum Gegenstand haben (Wärmequellen). Dementsprechend gliedert sich das Kapitel in drei Abschnitte.

1.0.1. Im Mittelpunkt des ersten Abschnittes stehen der Aufbau und der Gebrauch verschiedener Temperaturmeßgeräte. Den Schülern wird zunächst die Unzuverlässigkeit der menschlichen Wärmeempfindung zur Bestimmung der Temperatur eines Körpers überzeugend demonstriert (V 1.1.1.). Anschließend werden ihnen einige Kenntnisse über die gebräuchlichsten Thermometer, denen sie in der Umwelt begegnen, vermittelt. Es ist daher anzustreben, daß für Demonstrationszwecke verschiedene Thermometerarten, z.B. Zimmerthermometer, Badethermometer, Außenthermometer, Einkochthermometer, Bimetallthermometer, Sixsches Thermometer, Fieberthermometer u. a., in der Unterrichtsmittelsammlung vorhanden sind.

Im Unterricht werden häufig die Temperaturen von Gasen oder Flüssigkeiten gemessen, die in Gefäßen eingeschlossen sind. Die Thermometer werden durch Stopfen mit Bohrung eingeführt. Deshalb sollte eine größere Anzahl genügend langer Laborthermometer bereitgehalten werden. Da das Ablesen der Temperaturen, besonders das Schätzen bis auf Zehntelgrade, den Schülern im Anfangsunterricht Schwierigkeiten bereitet, können außer den im Versuch 1.1.3. vorgeschlagenen Thermometermodellen auch Projektionsthermometer oder Projektionsfolien genutzt werden. Dem Versuch 1.1.4. (Markieren der Fixpunkte bei Thermometern) sollte der Vorzug gegenüber dem Versuch 1.1.5. (Nachprüfen der Fixpunkte an einem Thermometer) gegeben werden, da die Fixpunkte markiert werden können, ohne daß der Lehrer auf die Abhängigkeit der Schmelz- und der Siedetemperatur vom Druck eingehen muß. Bei dem Versuch 1.1.5. ist dieses Wissen unbedingt erforderlich, da sich sonst falsche Vorstellungen über die Exaktheit von Messungen entwickeln könnten. Beachtet werden sollte noch, daß man allgemein von Schmelztemperaturen und Siedetemperaturen spricht, jedoch bei den Fixpunkten vom Schmelzpunkt und vom Siedepunkt.

Am Versuch 1.1.7. (Elektrische Temperaturmessungen mit einem behelfsmäßigen Thermoelement) kann den Schülern gezeigt werden, daß Temperaturen auf dem Wege der Meßwertwandlung auch elektrisch gemessen werden können. Auf die

Funktion des Meßwertwandlers braucht dabei nicht eingegangen zu werden. Auch eine Skalierung der Meßgeräte in Celsiusgraden ist in der Regel für Schulzwecke nicht erforderlich. Dagegen ist es angebracht, auf die Bedeutung der Thermoelemente in der Technik, besonders für die Fernablesung von Temperaturen (z. B. in Glühöfen), hinzuweisen.

Da in der Schule Kenntnisse über die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Halbleitern vermittelt werden, erscheint es sinnvoll, den Schülern zu zeigen, wie Halbleiterbauelemente (Thermistoren) zur Temperaturmessung verwendet werden können (V 1.1.8.). Das z. Z. an den Schulen vorhandene Schülerexperimentiergerät „Elektrik“ enthält einen Thermistor vom Typ TNA, mit dem der Anstieg der Thermistorstromstärke bei Temperaturerhöhung gut zu zeigen ist, der aber zur Temperaturmessung nur bedingt verwendet werden kann. Dazu sind Thermistoren vom Typ TNM oder TNK geeigneter. Aber auch bei diesen Bauelementen müssen die Versuchsdaten dem zur Verfügung stehenden Thermistortyp angepaßt werden. Zur Temperaturmessung mit Bimetallstreifen können die Versuche 2.1.12. bis 2.1.14., eventuell mit geringen Änderungen, genutzt werden.

1.0.2. Im 2. Abschnitt werden Versuche zusammengestellt, die die Umwandlung verschiedener Energiearten in Wärmeenergie zeigen sollen. Gleichzeitig können die Versuche genutzt werden, um die Schüler mit den im Unterricht und im Haushalt verwendeten Wärmequellen vertraut zu machen. Einige Versuche sind besonders geeignet, Arbeits- und Brandschutzbelehrungen anschaulich und überzeugend zu gestalten. Besonders die Flammen- und Oberflächentemperaturuntersuchungen sollten dazu genutzt werden.

Auf den Zusammenhang zwischen Wärme und Molekularbewegung wird in diesem Abschnitt nicht eingegangen. Man vergleiche dazu die Versuche 2.3.5. und 3.4.15. dieses Teiles sowie weitere Versuche in „Physikalische Schulversuche“, Teile 1/2, 3/4/5 und 11.

1.0.3. Die Gleichung für die Ermittlung der *Wärmemenge*, der Wärmeenergie, die von einem Körper abgegeben oder aufgenommen wird, ohne daß dabei eine Änderung des Aggregatzustandes (Schmelzen, Erstarren, Verdampfen, Kondensieren, Sublimieren) stattfindet, wird experimentell am zweckmäßigsten durch den Versuch 1.3.1. hergeleitet. Man ermittelt die Proportionalitäten

$$W_w \sim \Delta\theta, \text{ für } m = \text{konstant},$$

sowie

$$W_w \sim m, \text{ für } \Delta\theta = \text{konstant}.$$

Häufig wird hieran anschließend im Unterricht die Proportionalität

$$W \sim m \cdot \Delta\theta$$

ohne Kommentar gegeben. Das ist mathematisch nicht exakt. Deshalb muß die Gültigkeit der Proportionalität  $W \sim m \cdot \Delta\theta$  durch zusätzliche Bildung der Quotienten

$$\frac{W_w}{m \cdot \Delta\theta}$$

gezeigt werden. Danach kann man die Gleichung

$$W_w = c \cdot m \cdot \Delta\theta$$

einführen.

Die physikalische Bedeutung des Faktors  $c$  als Materialgröße („Materialkonstante“ in einem bestimmten Temperaturbereich) kann anschließend herausgearbeitet werden.

Die *spezifische Wärmekapazität*  $c$  (früher: spezifische Wärme) fester und flüssiger Stoffe wird durch die vorgeschlagenen Versuche qualitativ und quantitativ bestimmt.

Für mehrere Versuche dieses Abschnitts wird die Verwendung von Tauchsiedern vorgeschlagen, weil sie leicht beschafft werden können und vor allem wegen ihrer definierten Wärmeabgabe für quantitative Versuche sehr geeignet sind.

Quantitative Versuche in diesem Abschnitt der Wärmelehre erfordern die Benutzung von Kalorimetern, wenn die Meßgenauigkeit höheren Ansprüchen genügen soll. Dann muß auch die Wärmekapazität  $C$  der Kalorimeter bei der Auswertung der Meßdaten berücksichtigt werden. Für die Bestimmung der Wärmekapazität von Kalorimetern bieten sich die Versuche 1.3.6. und 1.3.7. an. Für Mischungsversuche eignen sich Dewargefäße. Aber auch durch zwei Bechergläser oder Konservendosen unterschiedlicher Größe (obere Ränder stumpf hämmern und feilen!) lassen sich behelfsmäßige Kalorimeter herstellen: Man stellt das kleinere Gefäß auf wärmedämmende Scheiben in das größere hinein (vgl. V 4.1.4.).

## 1.1. Die Temperatur

### 1.1.1. Sinnestäuschung beim subjektiven Beurteilen von Temperaturen

- 4 Schüsseln
- 2 Bechergläser (1000 ml) oder  
2 Aluminiumtöpfe
- Tauchsieder oder  
Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtgewebe mit Asbest
- Thermometer (0 °C bis 100 °C)

#### Versuch 1

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 1.1.1./1. Ohne den Schülern Einzelheiten mitzuteilen, wird Schüssel I mit möglichst kaltem Wasser, Schüssel IV mit Wasser, das eine Temperatur von 45 °C bis 50 °C hat, gefüllt. In die Schüsseln II und III kommt Wasser gleicher, mittlerer Temperatur, das man durch Mischen von warmem und kaltem Wasser erhalten kann.

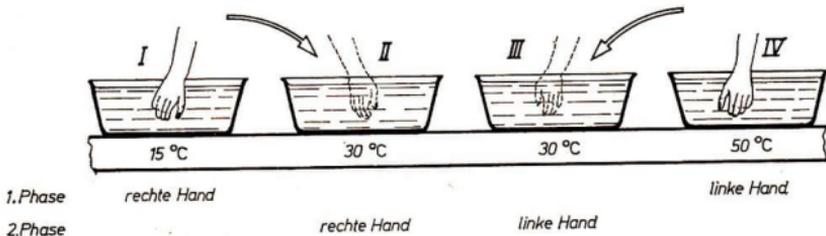


Abb. 1.1.1./1 Subjektive Beurteilung von Temperaturen

Einige Schüler werden aufgefordert, die Wassertemperaturen in den Schüsseln II und III zu beurteilen, zuvor aber ihre Hände etwa eine halbe Minute lang in die Schüsseln I und IV zu halten. Die Schüler kommen übereinstimmend zu dem Ergebnis, daß das Wasser in Schüssel II wärmer sei als in Schüssel III.

### Versuch 2

Damit den Schülern die Sinnestäuschung ganz deutlich wird, sollte der Versuch in folgender Form noch einmal durchgeführt werden: Die Schüsseln werden vor den Augen der Schüler wie bei Versuch 1 gefüllt und die Temperaturen des Wassers in den Schüsseln mit dem Thermometer gemessen.

Obwohl den Schülern nun bekannt ist, daß sich in den Schüsseln II und III Wasser mit gleicher Temperatur befindet, wird bei einer wiederholten subjektiven Beurteilung den Versuchspersonen, die vorher ihre Hände in die Schüsseln I und IV getaucht haben, das Wasser in Schüssel II wärmer erscheinen als in Schüssel III.

### Bemerkung

Man kann den Versuch als Variante auch mit drei Schüsseln durchführen. Dabei sollte die mittlere Schüssel so groß sein, daß sich die Hände beim Eintauchen nicht berühren. Diese Variante hat den Nachteil, daß den Schülern die Sinnestäuschung weniger deutlich wird, weil sie wissen, daß die mittlere Schüssel nur Wasser gleicher Temperatur enthält.

## 1.1.2. Thermometermodell mit Wasserfüllung

1. Siedekolben (125 ml)
2. durchbohrter Gummistopfen
3. Kapillarröhre mit ausgezogener kurzer Spitze (Länge etwa 300 mm) ©
4. Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtgewebe mit Asbest
5. Kartonstreifen (50 mm × 300 mm)
6. Becherglas (600 ml)
7. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
8. Tinte oder Farbstoff

### Methodische Hinweise

1. Durch diesen Versuch soll den Schülern gezeigt werden, daß man die Volumenänderung einer Flüssigkeit (in diesem Falle Wasser; vgl. jedoch V 2.2.3.) beim Erwärmen bzw. Abkühlen zur Temperaturmessung ausnutzen kann.
2. Die Skalierung des Thermometers mit Wasserfüllung kann auch während des Abkühlens erfolgen. Sie nimmt dann jedoch mehr Zeit in Anspruch.
3. Überzeugend ist der Versuch besonders dann, wenn gezeigt wird, daß beim Erwärmen wie beim Abkühlen die gleichen Skalenwerte bei bestimmten Temperaturen angezeigt werden.

### Herstellen des Thermometermodells

Der Siedekolben wird mit gefärbtem Wasser gefüllt. Man verschließt ihn fest mit dem Stopfen, in den durch die Bohrung die Kapillarröhre eingeführt wurde (Abb. 1.1.2./1).

Unter dem Stopfen oder im Rohr dürfen sich keine Luftblasen befinden. Die Flüssigkeit sollte etwa 100 mm hoch in der Glasröhre stehen.



Abb. 1.1.2./1 Modell-  
thermometer mit  
Wasserfüllung

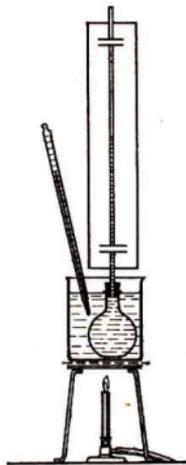


Abb. 1.1.2./2 Anfer-  
tigen einer behelfs-  
mäßigen Skale

### Versuch

Das Thermometermodell stellt man in ein Becherglas mit Wasser, das langsam erwärmt wird. Dabei wird durch Vergleichen mit dem Thermometer die behelfsmäßige Skale angefertigt (Abb. 1.1.2./2). Da die Wasserfüllung sehr viel mehr Wärmeenergie aufnimmt als das Quecksilber des Thermometers, tritt das Temperaturgleichgewicht nur langsam ein. Es empfiehlt sich daher, die Temperatur des Wassers im Becherglas durch eine kleine Bunsenbrennerflamme bei der Anfertigung der Behelfsskale über kurze Zeitabstände konstant zu halten.

## 1.1.3. Thermometermodell für Ableseübungen <sup>®</sup>

1. Brett (1000 mm × 150 mm × 10 mm)
2. Glasrohr mit gerundeten Rändern (Innendurchmesser 6 mm; Länge 850 mm)
3. 4 Vierkanteleisten (30 mm × 10 mm × 10 mm)
4. Gardinenschnur (1750 mm; weiß)
5. Zugfeder oder Gummiband (50 mm)
6. 2 Schellen aus Blechstreifen (60 mm × 40 mm)

### Methodische Hinweise

1. Ableseübungen an Thermometermodellen werden schon in der Unterstufe durchgeführt, so daß sie im Physikunterricht eine Wiederholung darstellen.
2. Die Ableseübungen können auch an Projektionsfolien, die im Unterrichtsmittelangebot enthalten sind, durchgeführt werden.

### Herstellen des Thermometermodells

Die Herstellung des Modells erfolgt nach Abbildung 1.1.3./1. Dazu werden in das Brett im Abstand von 860 mm zwei 5 mm weite Löcher gebohrt. Zwischen die Löcher leimt man vier kleine Vierkanteleisten auf der Vorder- und Rückseite so auf

dem Brett fest, daß sie bündig mit den Bohrungen abschließen. Auf der Rückseite werden die den Löchern zugewandten Außenkanten abgerundet und ge-  
glättet.

Mit der Rundfeile wird in die auf der Vorderseite angebrachten Vierkanteleisten je eine Vertiefung unter den Bohrungen im Brett so eingefleht, daß die Glasröhre eingeschoben werden kann. Die Schellen sind so auf dem Grundbrett zu befestigen, daß sie die Glasröhre halten und die Löcher verdecken.

Von der Gardinenschnur wird etwa die Hälfte eingefärbt und durch die Bohrungen in das Glasrohr hinein- bzw. aus ihm herausgeführt. Die Enden werden durch die Zugfeder oder das Gummiband auf der Rückseite des Gerätes verbunden. An der Vorderseite wird die Skale angebracht, an der die Ablesübungen vorgenommen werden können.

#### Verwendung des Thermometermodells

Der eingefärbte Teil der Gardinenschnur veranschaulicht die Flüssigkeitssäule. Durch Ziehen an der Schnur kann jede gewünschte Einstellung vorgenommen werden.

Das Gerät kann für alle Temperaturablesübungen eingesetzt werden. Besonders wird sein Einsatz zum Veranschaulichen von Temperaturdifferenzen zwischen Temperaturen um den Gefrierpunkt des Wassers empfohlen.

#### Bemerkungen

1. Ein ähnliches Gerät ist im Unterrichtsmittelangebot für die Unterstufe enthalten.
2. Für Ablesübungen auf unterschiedlich geteilten Skalen können auf der Vorderseite des Gerätes Skalen mit anderen Teilungen angebracht werden.

### 1.1.4. Markieren der Fixpunkte bei Thermometern [SE]

#### Zu Versuch 1

1. Thermometer mit verdeckter Skale
2. Kochring mit Stiel
3. Kartonstreifen
4. Vertikalmaßstab
5. Trichter ( $\varnothing$  120 mm)
6. kleines Becherglas
7. Eis

#### Zu Versuch 2

- Geräte 1. bis 4., außerdem
8. Erlenmeyerkolben (500 ml; weithalsig)
  9. Stativheizplatte (220 V; 150 W)
  10. Siedeperlen

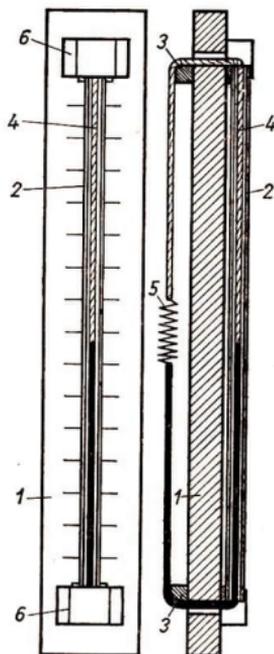


Abb. 1.1.3./1 Thermometermodell für Ablesübungen

*Methodische Hinweise*

1. Wird der Versuch als Schülerexperiment durchgeführt, so ist es sinnvoll, die Abdeckhülse für die Laborthermometerskala des SEG Kalorik zu nutzen. Bei Verwendung des mit farbigem Alkohol gefüllten Thermometers sind gute Beobachtungsergebnisse zu erzielen. Bei Quecksilberthermometern ist die Flüssigkeitssäule schlecht zu sehen.
2. Es empfiehlt sich, die Versuche mehrere Male zu wiederholen, damit die Unveränderlichkeit der Fixpunkte überzeugend demonstriert wird.

*Versuch 1*

Der Thermometerflüssigkeitsbehälter eines Thermometers ohne Skale wird in einen mit schmelzendem Eis gefüllten Trichter gesteckt (Abb. 1.1.4./1). Nach kurzer Zeit stellt sich Temperaturgleichgewicht ein. Der Stand der Thermometerflüssigkeit im Steigrohr wird auf dem Kartonstreifen markiert (*Schmelzpunkt*).

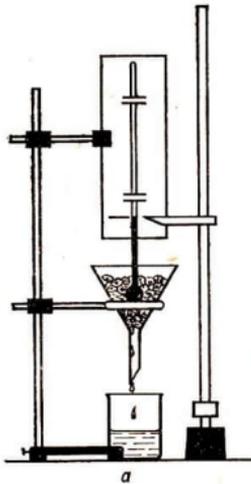


Abb. 1.1.4./1  
Markieren  
der Fix-  
punkte eines  
Thermome-  
ters  
(Schmelz-  
temperatur  
des Eis)

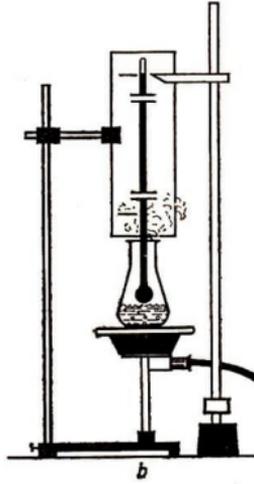


Abb. 1.1.4./2  
Markieren  
der Fix-  
punkte eines  
Thermome-  
ters (Siede-  
temperatur  
des Wassers)

*Versuch 2*

Das Thermometer wird anschließend durch den Hals in den Erlenmeyerkolben eingeführt, in dem sich siedendes Wasser befindet. Der Thermometerflüssigkeitsbehälter sollte sich etwas oberhalb der Wasseroberfläche befinden (Abb. 1.1.4./2). Tritt keine Veränderung des Thermometerflüssigkeitsstandes im Steigrohr mehr ein, so wird der Stand auf dem Kartonstreifen markiert (*Siedepunkt*).

*Bemerkungen*

1. Für den aus dem Erlenmeyerkolben bei Versuch 2 ausströmenden Wasserdampf sollte genügend Platz gelassen werden, damit kein Überdruck entsteht.
2. In das Wasser, das zum Sieden gebracht wird, sind Siedeperlen einzulegen.
3. Wird der Versuch als Demonstrationsversuch durchgeführt, so empfiehlt es sich, das Schattenthermometer ( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) zu nutzen und die Skale mit weißem Papier zu überdecken.

### 1.1.5. Nachprüfen der Fixpunkte an einem Thermometer

- |                                    |                                    |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 1. Thermometer (−10 °C bis 110 °C) | 5. Kochring mit Stiel              |
| 2. Trichter (Ø 120 mm)             | 6. Eis                             |
| 3. Becherglas (400 ml)             | 7. Stativheizplatte (220 V; 150 W) |
| 4. Erlenmeyerkolben (500 ml)       | 8. Siedeperlen                     |

#### Methodischer Hinweis

Die Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Luftdruck kann den Schülern erst erklärt werden, wenn der Einfluß des Druckes auf die Siedetemperatur bekannt ist. Zur Orientierung sollen die beigefügte Tabelle und das Diagramm (Abb. 1.1.5./2) dienen.

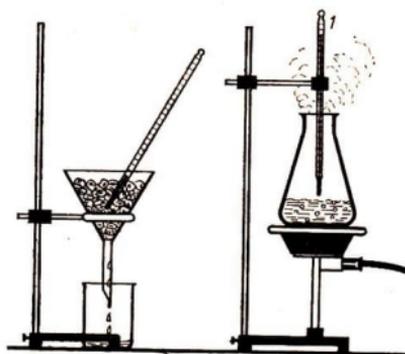


Abb. 1.1.5./1 Nachprüfen der Fixpunkte an einem Thermometer

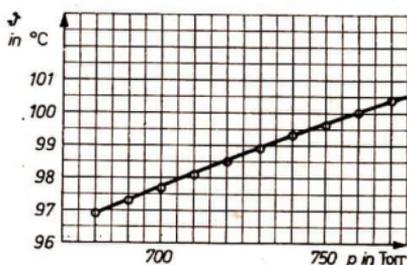


Abb. 1.1.5./2 Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Luftdruck (gemessen in Torr)

#### Versuch

Schmelz- und Siedepunkt werden ähnlich wie im V 1.1.4. festgestellt (Abb. 1.1.5./1). Etwa auftretende Abweichungen von der Marke 0 °C oder 100 °C der Thermometerskala werden notiert. Auf diese Weise kann man die Thermometerskala überprüfen oder zwei Thermometerskalen miteinander vergleichen.

#### Bemerkungen

1. Beim Nachprüfen des Schmelzpunktes sollte gut zerstoßenes, salzfreies Eis verwendet werden, das mit destilliertem Wasser zu einem Brei angerührt ist.
2. In das Wasser, das zum Sieden gebracht wird, sind Siedeperlen zu geben.

#### Zusammenhang zwischen dem Luftdruck und der Siedetemperatur

Luftdruck p in Torr	680	690	700	710	720	730	740
Siedetemperatur θ in °C	96,9	97,3	97,7	98,1	98,5	98,9	99,3

Luftdruck $p$ in Torr	750	760	770	780	790	800
Siedetemperatur $\vartheta$ in $^{\circ}\text{C}$	99,6	100,0	100,4	100,7	101,1	101,4

Unter Benutzung eines in kPa geeichten Meßgerätes ergeben sich folgende Meßwerte (Abb. 1.1.5./3 zeigt das entsprechende Diagramm):

Luftdruck $p$ in kPa	90,0	92,0	94,0	96,0	98,0
Siedetemperatur $\vartheta$ in $^{\circ}\text{C}$	96,7	97,3	97,9	98,5	99,1

Luftdruck $p$ in kPa	100,0	102,0	104,0	106,0
Siedetemperatur $\vartheta$ in $^{\circ}\text{C}$	99,7	100,2	100,7	101,2

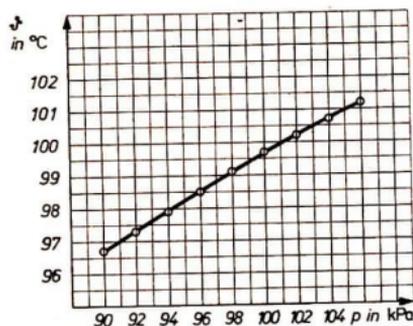


Abb. 1.1.5./3 Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Luftdruck (gemessen in kPa)

## 1.1.6. Feststellen von Höchst- und Tiefsttemperaturen

1. Maximum- und Minimumthermometer nach Six
2. 2 Bechergläser

### Methodische Hinweise

1. Der Versuch kann je nach der unterrichtlichen Situation variiert werden. So kann man die Messungen zu verschiedenen Tageszeiten oder an verschiedenen temperierten Stellen des Schulgebäudes ausführen lassen.
2. Im Zusammenhang mit dem Versuch sollte auf die Anwendungen in der Meteorologie und Medizin eingegangen werden.

*Versuch*

Die beiden Stahlstifte des Sixschen Thermometers werden durch einen Magneten an die Quecksilbersäule herangezogen. Dann stellt man das Thermometer nacheinander für wenige Minuten in ein Becherglas mit kaltem und in ein Becherglas mit heißem Wasser (etwa 50 °C). Anschließend wird es auf den Experimentiertisch gelegt.

Nach kurzer Zeit können am Stand der Quecksilbersäule die Zimmertemperatur und am Stand der beiden Stahlstifte die Wassertemperaturen abgelesen werden.

*Bemerkungen*

1. Außer dem Sixschen Maximum-Minimum-Thermometer können auch horizontal angeordnete Thermometer zur Messung von Höchst- und Tiefsttemperaturen, wie sie die Meteorologen verwenden, eingesetzt werden.
2. Auch das Fieberthermometer kann als eine Variante eines Maximumthermometers eingesetzt werden.

### 1.1.7. Elektrische Temperaturmessungen mit einem behelfsmäßigen Thermoelement

*Zu Versuch 1*

1. 2 gleich lange Konstantan- und Eisendrähte oder Konstantan- und Kupferdrähte (Länge etwa 300 mm)
2. Klemmenstange
3. Spiegelgalvanometer oder Spannungsmesser (Meßbereich 100 mV)
4. Becherglas

*Zu Versuch 2*

Geräte 1. bis 4., außerdem

5. Stativheizplatte (220 V; 150 W)
6. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
7. Eis

*Herstellung des Thermoelements*

Ein Konstantan- und ein Eisendraht oder ein Konstantan- und ein Kupferdraht gleicher Länge werden an zwei Buchsen einer Klemmenstange befestigt und die freien Enden zusammengelötet (Abb. 1.1.7./1). Es genügt auch, wenn die freien Enden blank gerieben und miteinander verdreht werden.

*Versuch 1*

Das Thermoelement wird durch zwei Verbindungsleiter an das Meßgerät angeschlossen. Die Berührungsstelle der beiden Drähte des Thermoelements kann im Wasserbad (Abb. 1.1.7./2) oder direkt mit der Flamme (Abb. 1.1.7./3) erwärmt werden. Bei hinreichender Empfindlichkeit des Meßgerätes ist ein gut beobachtbarer Ausschlag festzustellen.

*Versuch 2*

Zwei Thermoelemente werden gegeneinander (z.B. Eisen- gegen Eisendraht) geschaltet. Die Lötstelle des einen taucht man in Eis; die des anderen erwärmt man

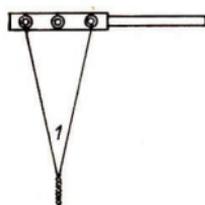


Abb. 1.1.7./1 Behelfsmäßiges Thermoelement

Abb. 1.1.7./2 Schaltung eines behelfsmäßigen Thermoelements (halbschematisch)

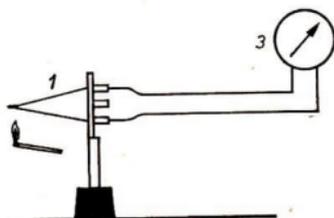
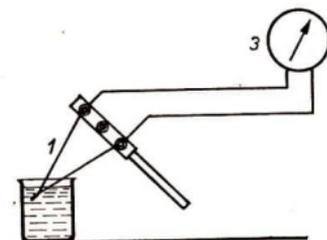


Abb. 1.1.7./3 Aufbau eines Thermoelements bei Erwärmung mit einer Flamme

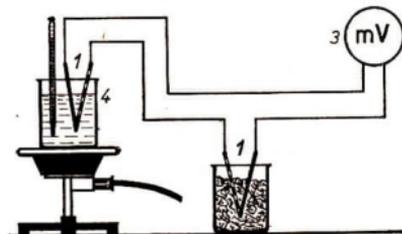


Abb. 1.1.7./4 Gegeneinanderschaltung von zwei Thermoelementen

in einem Wasserbad (Abb. 1.1.7./4). Die Temperatur des Wassers wird durch ein Thermometer festgestellt. Die Thermospannung ist annähernd proportional zur Temperaturdifferenz.

#### Bemerkungen

1. Auch industriell gefertigte Thermoelemente können im Unterricht gut verwendet werden.
2. Für Messungen im Wasserbad sind gelötete Thermoelemente besser geeignet.
3. Verdrehte Drähte eines Thermoelementes können im Lichtbogen geschweißt werden.
4. Es wird empfohlen, die Thermoelemente für die Wiederverwendung aufzubewahren. Dann lohnt es sich auch, für den Spannungsmesser eine Temperaturskala anzufertigen ( $^{\circ}\text{C}$  oder  $\text{K}$ ).

## 1.1.8. Elektrische Temperaturmessungen mit einem Thermistor

### Zu Versuch 1

1. Thermistor (Typ TNA 24/100)
2. Strommesser (10 mA)
3. Spannungsquelle (1 V bis 20 V—)
4. Klemmenstange
5. Zylinderfuß

### Versuch 1

Der Thermistor wird an einer Klemmenstange befestigt und an den Strommesser und die Spannungsquelle angeschlossen (Abb. 1.1.8./1). Die Schaltung erfolgt nach

### Zu Versuch 2

- Geräte 2. und 3., außerdem
6. Thermistor (Typ TNM oder TNK)
  7. Stativheizplatte (220 V; 150 W)
  8. Becherglas (800 ml)
  9. Thermometer ( $0^{\circ}\text{C}$  bis  $100^{\circ}\text{C}$ )

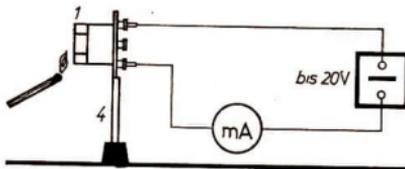


Abb. 1.1.8./1 Schaltung eines Thermistors (halbschematisch)

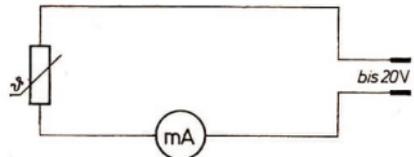


Abb. 1.1.8./2 Schaltskizze zur Messung der Stromstärke im Thermistorkreis

dem Schaltplan in Abbildung 1.1.8./2. Nach geeigneter Wahl der Spannung ist beim Erwärmen des Thermistors eine deutliche Zunahme der Stromstärke zu beobachten. Bei der Wahl der Anfangsspannung sollte beachtet werden, daß eine Eigen Erwärmung des Thermistors durch den elektrischen Strom möglichst vermieden wird. Oft genügt nämlich schon die Handwärme, um eine merkliche Veränderung der Stromstärke hervorzurufen. Beim Entfernen der Wärmequelle sinkt jedoch die Stromstärke meist nicht gleich ab, da die Thermistoren vom Typ TNA eine verhältnismäßig lange Zeit zum Abkühlen benötigen. Man kann durch Anblasen des Thermistors ein rascheres Absinken des Meßgerätausschlages erreichen.

**Versuch 2**

Die Schaltung erfolgt nach Abbildung 1.1.8./2. Dabei befindet sich der Thermistor in einem Wasserbad, das erwärmt und dessen Temperatur mit einem Thermometer gemessen werden kann (Abb. 1.1.8./3). Der Strommesser kann mit einer entsprechend geeichten Skale versehen und zur Temperaturmessung verwendet werden.

**Bemerkungen**

1. Die in Abbildung 1.1.8./4 dargestellten Werte wurden mit einem Thermistor vom Typ TNM 100 im Wasserbad bei einer Spannung von 2,4 V gemessen.
2. Es empfiehlt sich, Thermistoren mit geeigneten Kaltwiderständen (etwa 100  $\Omega$  bis 1000  $\Omega$ ) und ausreichender maximaler Belastbarkeit auszuwählen. Dabei sollte beachtet werden,

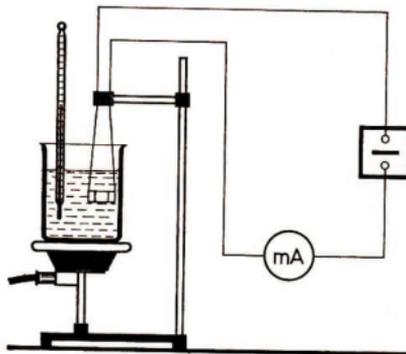


Abb. 1.1.8./3 Temperaturmessung mit einem Thermistor

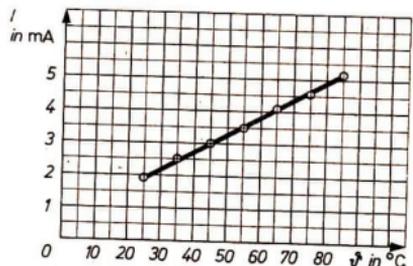


Abb. 1.1.8./4 Abhängigkeit der Stromstärke von der Temperatur des Thermistors

daß der Innenwiderstand des Meßgerätes klein gegenüber dem Widerstand des Thermistors ist, da sonst die Meßwerte zu ungenau werden. Der Thermistorwiderstand darf jedoch nur so groß sein, daß eine gut sichtbare Anzeige der Meßwertänderungen der elektrischen Stromstärke erfolgen kann.

3. Im Wasserbad treten an ungeschützten Thermistoren (z.B. vom Typ TNA) chemische Veränderungen auf, die zu einer schnellen Zerstörung führen. Oft genügt jedoch schon ein Lacküberzug, um die chemischen Reaktionen zu verhindern. Dabei ist jedoch zu beachten, daß der im Wasser auftretende Strom die Meßergebnisse beeinflußt. Bei Messungen in einem Ölbad ist dieser Einfluß wesentlich geringer.

## 1.2. Umwandlung verschiedener Energiearten in Wärmeenergie – Wärmequellen

### 1.2.1. Umwandlung mechanischer Energie in Wärmeenergie durch Reibung

#### *Zu Versuch 1*

1. Schwungmaschine
2. Hartholzstab
3. Weichholzbrett

#### *Zu Versuch 2*

4. Gerät zur Umwandlung mechanischer Energie in Wärmeenergie nach Wildermuth, bestehend aus Aluminiumzylinder, Kugellagerachse, Zählwerk und Leinenband mit Ösen
5. Handrad
6. Thermometer (0 °C bis 100 °C; Teilung  $\frac{1}{10}$  K)
7. 2 Federkraftmesser (10 N oder 1 kp)
8. Quecksilber

#### *Methodische Hinweise*

1. Die Versuche können auf verschiedene Weise variiert werden, je nach der didaktischen Funktion, die ihnen zugeordnet ist. Einige Varianten werden in den Bemerkungen zum Abschluß der Versuchsbeschreibung vorgeschlagen.
2. Der Versuch nach Wildermuth (Versuch 2), der früher zum experimentellen Nachweis des mechanischen Wärmeäquivalents genutzt wurde, kann zur Demonstration der Umwandlung mechanischer Energie in Wärmeenergie oder zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität der verwendeten Flüssigkeit (hier Quecksilber) genutzt werden.

#### *Versuch 1*

Ein etwa 120 mm langer Rundstab aus Hartholz wird in das Futter einer Schwungmaschine eingespannt und am freien Ende keilförmig zugeschnitten. Beim Drehen der Schwungscheibe kommt es infolge der Reibung zwischen dem Rundstab und dem Auflagebrett zu einer beachtlichen Erwärmung (Abb. 1.2.1./1). Wird der Rundstab längere Zeit gedreht, so ist ein leichter Brandgeruch wahrnehmbar.

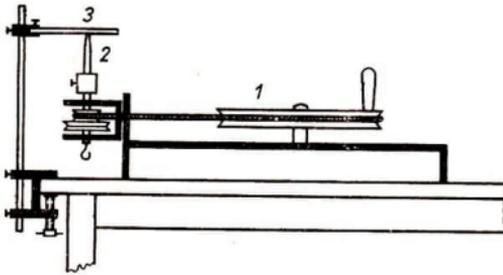


Abb. 1.2.1./1 Verwendung einer Schwingmaschine zum Antrieb eines „Feuerbohrers“

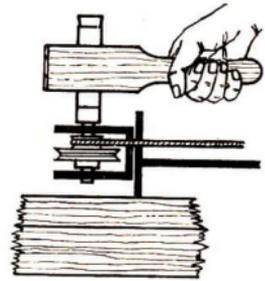


Abb. 1.2.1./2 Schwingmaschine mit Reibungseinsatz

*Bemerkungen*

1. Zum Antrieb des Hartholzstabes kann auch ein Bindfaden, der um den Hartholzstab geschlungen wird und an dessen Enden zwei Personen wie an einer Säge ziehen, genutzt werden (Prinzip des „Feuerbohrers“ bei Naturvölkern).
2. Der gewünschte Effekt tritt noch schneller ein, wenn eine elektrische Bohrmaschine, bei der der Holzstab nur in das Spannfutter eingespannt zu werden braucht, verwendet wird.
3. Der gleiche Effekt kann beim Sägen, Feilen, Schleifen und an Dreh-, Bohr- und Hobelmaschinen beobachtet werden.
4. Man kann auch einen Reibungseinsatz auf die Achse der Stufenscheibe einer Schwingmaschine schrauben. Er besteht aus einem Hohlzylinder, in den etwas Äther gefüllt und der mit einem weichen Stopfen gut verschlossen ist. Außen wird der Zylinder von einer mit einem Korkfutter versehenen Holzzange umfaßt, die unter Druck gegen ihn gepreßt wird (Abb. 1.2.1./2). Setzt man die Schwingmaschine in Umdrehung, so wird der Stopfen nach einiger Zeit unter heftigem Knall nach oben geschleudert. Der Äther ist infolge der Reibungswärme verdampft und hat den Korken aus seinem Sitz herausgetrieben. Sollte eine Holzzange nicht vorhanden sein, so kann man an ihrer Stelle auch ein raues Wolltuch verwenden, das man gegen den Zylinder drückt.

*Versuch 2*

Das Gerät zur Umwandlung mechanischer Energie in Wärmeenergie besteht aus einer vertikalen Kugellagerwelle, auf der eine Stufenscheibe und der eigentliche Meßzylinder angebracht sind. An das untere Ende der Welle ist ein Zählwerk angeschlossen, das es ermöglicht, die Anzahl der durchgeführten Umdrehungen festzustellen. In den nach oben offenen Meßzylinder aus Aluminium wird ein Thermometer eingeführt, das an einem Stativ befestigt ist. Der Zwischenraum im Hohl-

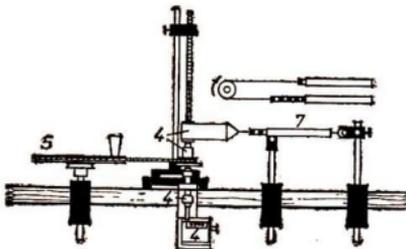


Abb. 1.2.1./3 Versuchsaufbau mit dem Gerät nach Wildermuth

zylinder ist zur Wärmeübertragung mit Quecksilber ausgefüllt. Um den Meßzylinder ist ein mit zwei Ösen versehenes breites Leinenband gelegt, das durch zwei waagrecht angebrachte Federkraftmesser eine Vorspannung erhält.

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 1.2.1./3. Zu Beginn des Versuches wird die Temperatur des Quecksilbers am hineingehängten Thermometer abgelesen. Dann versetzt man das Handrad der Schwungmaschine eine Zeitlang (etwa 2 Minuten) in Umdrehung. Dabei unterscheidet sich die Anzeige der beiden Federkraftmesser um  $\Delta F$ .

Das Produkt aus dem Meßzylinderumfang  $u$ , aus der Kraftdifferenz  $\Delta F$  und der Anzahl der Umdrehungen  $U$  ist gleich der aufgewandten mechanischen Arbeit  $W_m$ . Die entstehende Wärmeenergie  $W_w$  ist proportional der Temperaturzunahme  $\Delta \theta$ , da die spezifische Wärmekapazität des Meßzylinders und des Quecksilbers als konstant angenommen werden kann.

#### Bemerkung

Der Versuch läßt sich variieren, wenn man das Thermometer mit ein wenig Aluminiumfolie umwickelt und so in den Meßzylinder einführt, daß es in diesem festsetzt. Es kann dann auf die zur Wärmeübertragung dienende Quecksilberfüllung verzichtet werden.

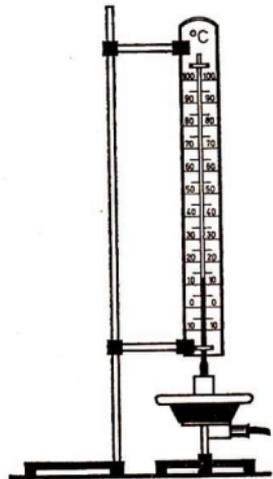
## 1.2.2. Umwandlung elektrischer Energie in Wärmeenergie mit Hilfe einer Stativheizplatte

1. Stativheizplatte (220 V; 150 W)
2. Aufsatz für Reagenzglas (aus SEG Kalorik)
3. Schauthermometer ( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) oder Laborthermometer ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

#### Methodische Hinweise

1. Versuche zur Wärmewirkung des elektrischen Stromes sind in den „Physikalischen Schulversuchen“, 6. Teil, V 2.3.1. bis 2.3.6., beschrieben. Bei diesen Versuchen werden als Energiewandler meist Heizwendeln benutzt.
2. Da den Schülern bei Schülerexperimenten eine geschlossene Stativheizplatte als Wärmequelle zur Verfügung steht, ist es angebracht, auf dieses Gerät besonders einzugehen. Dabei empfiehlt es sich, den Schülern ein älteres Heizgerät, bei dem die Heizwendel noch sichtbar ist, zu zeigen, damit sie den Energiewandler sehen können.
3. Auf die erhebliche Wärmeentwicklung und die daraus resultierende sehr hohe Temperatur sowie auf die deshalb erforderliche Vorsicht beim Umgang mit der Stativheizplatte sollte unbedingt hingewiesen werden.

Abb. 1.2.2./1 Messung der Oberflächentemperatur einer Stativheizplatte



*Versuch*

Auf die Stativheizplatte wird der Aufsatz für das Reagenzglas des SEG Kalorik gestellt und das Schauthermometer darüber angebracht (Abb. 1.2.2./1). Dabei sollte der Thermometerflüssigkeitsbehälter (nach Abschrauben des Schutzhaubenhalters) in den Reagenzglashalter eingeführt werden. Alle Schüler können den schnellen Anstieg der Oberflächentemperatur der Heizplatte beobachten (in etwa 3 min werden  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht).

Wird das Laborthermometer anstelle des Schauthermometers verwendet, so kann länger erwärmt und eine Temperatur von  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  gemessen werden.

*Bemerkungen*

1. Wenn die Maximaltemperatur der Heizplattenoberfläche bestimmt werden soll, muß das Gerät mindestens 20 min lang eingeschaltet bleiben.
2. Die Temperatur kann auch mit einem Thermoelement gemessen werden (vgl. V 1.1.7.).

### 1.2.3. Umwandlung chemischer Energie in Wärmeenergie durch Verbrennung

1. Thermoelement (nach V 1.1.7.)
2. Kerze
3. Spirituslampe
4. Bunsenbrenner
5. Spannungsmesser (100 mV)

*Methodische Hinweise*

1. Um den Schülern die Umwandlung chemischer Energie in Wärme zu demonstrieren, genügen schon zwei oder drei unterschiedliche Flammen.
2. Zur Vorführung unterschiedlicher Flammentemperaturen sollte der Lehrer vor allem die Flammen untersuchen, mit denen die Schüler zu tun haben.

*Versuch*

Die Wärmequellen werden so aufgestellt, daß sich ihre Flammenspitzen in gleicher Höhe befinden (Abb. 1.2.3./1). Als Temperaturfühler, der etwa 5 cm über den Flammenspitzen angebracht werden kann, ist ein Thermoelement mit verdrehten Drahtenden zu verwenden.

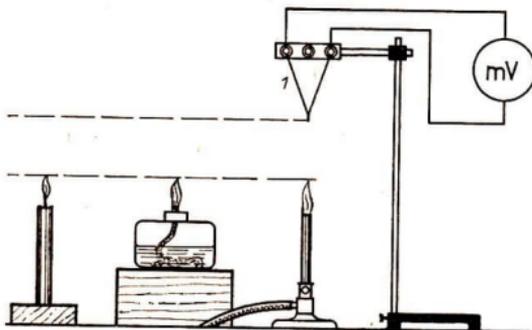


Abb. 1.2.3./1 Vergleich verschiedener Flammentemperaturen (halbschematisch). Das Thermoelement ist in die Zeichenebene hineingelegt. Es liegt in Wirklichkeit waagrecht und zeigt nach vorn.

Wird das Thermoelement von der Kerze zum Bunsenbrenner verschoben, so steigt der Ausschlag des Meßinstrumentes an. Verschiebt man das Thermoelement in umgekehrter Richtung, so verringert sich der Ausschlag.

#### Bemerkungen

1. Die Höhe des Thermoelements über den Wärmequellen sollte so eingestellt werden, daß das Meßinstrument über dem Bunsenbrenner voll ausschlägt.
2. Wird ein Thermoelement mit zusammengelöteten Enden verwendet, so muß man darauf achten, daß es nicht zerstört wird.

### 1.3. Wärmemenge — Wärmekapazität

#### 1.3.1. Experimente zur Herleitung der Gleichung für die Wärmemenge [SE]

##### Zu Variante a

1. 3 Bechergläser (400 ml; 800 ml; 1000 ml)
2. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
3. 3 Untersätze aus Holz, Polystyrol o. ä. für die Bechergläser
4. Zentraluhr oder 3 Uhren mit Sekundenzeigern oder 3 Stoppuhren
5. 1 Becherglas (400 ml; Inhalt etwa 300 ml Öl)
6. Tafelwaage
7. Tauchsieder (220 V; 300 W)

##### Zu Variante b

- Geräte 1. bis 6., außerdem
8. 2 Bechergläser (800 ml)
  9. 3 Tauchsieder unterschiedlicher Leistung (z. B. 300 W; 500 W; 1000 W)

##### Methodische Hinweise

1. Die Herleitung der Proportionalitäten  $W_w \sim \Delta\theta$  (für  $m = \text{konstant}$ ) und  $W_w \sim m$  (für  $\Delta\theta = \text{konstant}$ ) sollte mittels Schülerdemonstrationsexperimenten (Parallelversuche) erfolgen.
2. Die zweckmäßigsten Wärmequellen für diese Experimente sind Tauchsieder (hoher Wirkungsgrad und bekannte Leistung).
3. Bei den Experimenten sollte man mit dem Aufnehmen der Meßwerte für die Temperaturen erst eine gewisse Zeit nach Einschalten der Tauchsieder beginnen, um Fehler durch das Erwärmen der Tauchsieder zu vermeiden.
4. Die Variante a hat den Vorteil, daß alle Schülergruppen eine gemeinsame Meßwertetabelle erarbeiten und daß die grafische Darstellung in einem einzigen Diagramm erfolgen kann. Das erleichtert die Auswertung.  
Die Variante b hat gegenüber der Variante a den Vorteil, daß neben der Bedingung  $m = \text{konstant}$  die Bedingung  $\Delta\theta = \text{konstant}$  vorgegeben werden kann.
5. Die Schüler müssen erkennen, daß die Gleichung  $W_w = c \cdot m \cdot \Delta\theta$  nur dann gilt, wenn sich der Aggregatzustand des Körpers, der die Wärmeenergie  $W_w$  aufnimmt oder abgibt, bei diesem Vorgang nicht ändert. Damit wird ihnen bewußt, daß man bei der Herleitung bzw. Bestätigung und Anwendung der Gleichung darauf zu achten hat, daß die Temperatur des Körpers hinreichend weit ober-

halb bzw. unterhalb der Schmelz- oder Siedetemperatur des entsprechenden Stoffes bleibt.

Variante a

Versuch 1

3 Schülergruppen zu je 2 Schülern ermitteln für 300 g bzw. 600 g bzw. 900 g Wasser den Temperaturverlauf beim Erwärmen in Abhängigkeit von der Zeit (Abb. 1.3.1./1). Dazu wird Leitungswasser mit einer Temperatur von etwa 15 °C abgewogen und erwärmt. Sobald die Temperatur des Wassers 20 °C erreicht hat, wird in Zeitabständen von 0,5 min die jeweilige Temperatur des Wassers abgelesen. Die Meßwerte werden in eine Tabelle eingetragen.

Beispiel einer Meßwertreihe

$t$ in min	$W_w$ in kW s	$m$ in g	$\vartheta$ in °C	$\Delta\vartheta$ in K	$\frac{W_w}{\Delta\vartheta}$ in $\frac{\text{kWs}}{\text{K}}$
0	0	300	20,0	—	—
0,5	9,0	300	27,0	7,0	1,3
1,0	18,0	300	33,0	13,0	1,4
1,5	27,0	300	39,5	19,5	1,4
2,0	36,0	300	46,5	26,5	1,4
2,5	45,0	300	53,0	33,0	1,4
3,0	54,0	300	59,5	39,5	1,4
0	0	600	20,0	—	—
0,5	9,0	600	23,5	3,5	2,6
1,0	18,0	600	26,5	6,5	2,8
1,5	27,0	600	30,0	10,0	2,7
2,0	36,0	600	33,5	13,5	2,7
2,5	45,0	600	37,0	17,0	2,6
3,0	54,0	600	40,5	20,5	2,6
0	0	900	20,0	—	—
0,5	9,0	900	22,5	2,5	3,6
1,0	18,0	900	24,5	4,5	4,0
1,5	27,0	900	27,0	7,0	3,9
2,0	36,0	900	29,0	9,0	4,0
2,5	45,0	900	31,5	11,5	3,9
3,0	54,0	900	33,5	13,5	4,0

Aus der grafischen Darstellung (Abb. 1.3.1./2) kann entnommen werden:

$W_w \sim \Delta\vartheta$ , für  $m = \text{konstant}$ , und

$W_w \sim m$ , für  $\Delta\vartheta = \text{konstant}$ .

Die Werte in der letzten Spalte der Tabelle bestätigen die Proportionalität

$W_w \sim \Delta\vartheta$ , für  $m = \text{konstant}$ .

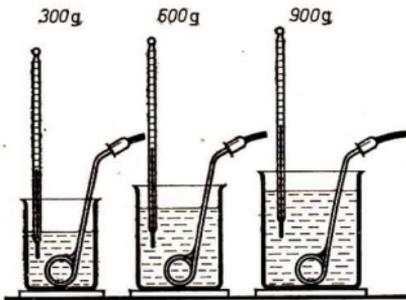


Abb. 1.3.1./1 Erwärmen verschiedener Wassermengen mit Hilfe gleicher Tauchsieder

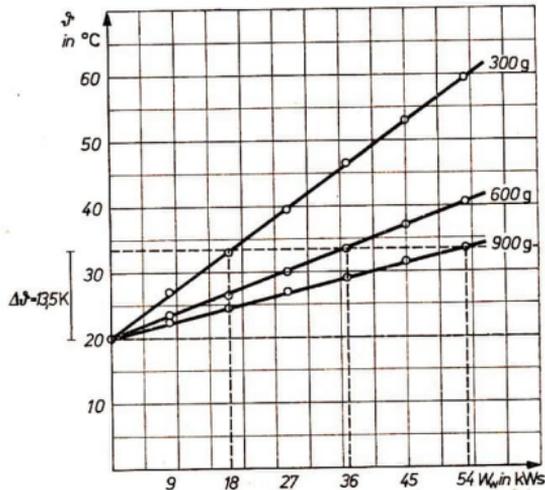


Abb. 1.3.1./2 Temperatur-Wärmemenge-Diagramm zur Variante a

Die nachträglich in der Tabelle durch Einrahmen hervorgehobenen Werte bestätigen:

$$W_w \sim m, \text{ für } \Delta\theta = \text{konstant.}$$

Insgesamt gilt

$$W_w \sim m \cdot \Delta\theta.$$

### Versuch 2

Das mit Öl gefüllte Becherglas (400 ml) wird auf eine Schale der Tafelwaage gestellt. Ein gleiches Becherglas, das auf der anderen Waagschale steht, wird so lange mit Wasser gefüllt, bis Gleichgewicht herrscht.

Nun werden beide Flüssigkeiten gleich lange mit gleichen Tauchsiedern erwärmt (etwa 1 min). Die Temperaturerhöhung des Öls ist etwa doppelt so groß wie die des Wassers.

Damit kann die physikalische Bedeutung des Faktors  $c$  in der Gleichung

$$W_w = c \cdot m \cdot \Delta\theta$$

diskutiert werden.

Öl hat also eine kleinere spezifische Wärmekapazität als Wasser.

*Variante b*

*Versuch 1*

3 Schülergruppen ermitteln für jeweils 600 g Wasser die Temperaturerhöhung nach 1 min bzw. 2 min bzw. 3 min, falls, wie bei Variante a, Versuch 1, drei Tauchsieder mit gleicher Leistung (300 W) verwendet werden sollen.

Sind drei Tauchsieder unterschiedlicher Leistung vorhanden, dann empfiehlt es sich, für alle Gruppen die gleiche Zeit, z. B. 2 min, vorzugeben.

In dem folgenden Beispiel wurde davon ausgegangen, daß drei Tauchsieder mit je 300 W und ein Tauchsieder mit 1000 W vorhanden sind. Die Leistung 600 W wurde durch Parallelschalten zweier Tauchsieder für ein Becherglas mit Wasser erreicht.

*Beispiel für die Meßwerte beim Bestätigen der Beziehung  $W_w \sim \Delta\theta$*

$m = 600 \text{ g}$

$P$ in kW	$t$ in min	$W_w$ in kWs	$\theta_1$ in °C	$\theta_2$ in °C	$\Delta\theta$ in K	$\frac{W_w}{\Delta\theta}$ in $\frac{\text{kWs}}{\text{K}}$
0,3	2	36	20	33,5	13,5	2,7
0,6	2	72	22	48,5	26,5	2,7
1,0	2	120	21	64	43	2,8

Daraus folgt  $W_w \sim \Delta\theta$ , für  $m = \text{konstant}$ .

*Versuch 2*

3 Schülergruppen ermitteln für 300 g bzw. 600 g bzw. 900 g Wasser die Wärmemenge, die jeweils benötigt wird, um eine bestimmte Temperaturdifferenz, z. B. 14 K, zu erreichen.

Es kann wiederum mit drei gleichen Tauchsiedern wie bei Variante a, Versuch 1, gearbeitet werden. Es empfiehlt sich jedoch, die Tauchsieder wie bei Versuch 1 der Variante b zu benutzen und dabei die Wärmequellen höherer Leistung für die jeweils größere Wassermenge vorzusehen.

Beispiel für die Meßwerte beim Bestätigen der Beziehung  $W_w \sim m$   
 $\Delta\vartheta = 14 \text{ K}$

$P$ in kW	$t$ in s	$W_w$ in kW s	$m$ in g	$\frac{W_w}{m}$ in $\frac{\text{kWs}}{\text{g}}$
0,3	59	17,7	300	0,059
0,6	61	36,6	600	0,061
1,0	54	54,0	900	0,060

Daraus folgt

$$W_w \sim m, \text{ für } \Delta\vartheta = \text{konstant.}$$

Insgesamt gilt

$$W_w \sim m \cdot \Delta\vartheta.$$

Die grafische Darstellungen zu den Versuchen 1 und 2 dieser Variante sind aus Abbildung 1.3.1./3 ersichtlich.

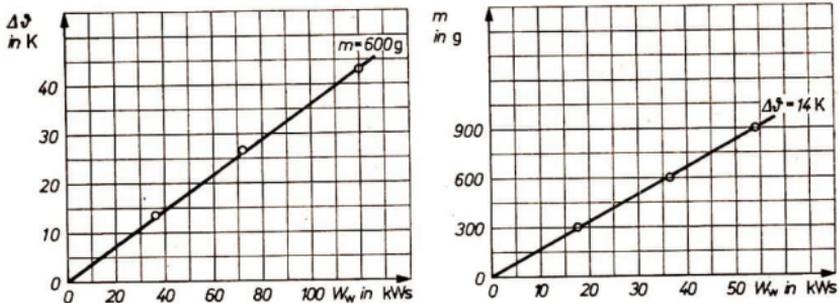


Abb. 1.3.1./3 Grafische Darstellung der Meßwerte zu den Versuchen 1 und 2 der Variante b

### Versuch 3

Vergleiche Versuch 2 der Variante a!

### Bemerkungen

1. Bei den Messungen ist darauf zu achten, daß die Thermometer an der gleichen Stelle gehalten und die Tauchsieder fortwährend bewegt werden. Andernfalls können bei der Temperaturmessung erhebliche Fehler auftreten.
2. Die Form der Bechergläser ist so zu wählen, daß die Tauchsieder optimale Eintauchtiefen erhalten.
3. Man sollte sich rechtzeitig davon überzeugen, daß die Daten der für die Versuche vorgesehenen Tauchsieder stimmen (z.B. 220 V; 300 W). Außerdem sollte man feststellen, ob während der Versuche auch die vorgesehene Netzspannung anliegt. Schon bei einer Schwankung der Leistung des Tauchsieders um 1% ist die erste Dezimale nach dem Komma (2. Spalte der Tabelle zu Versuch 1, Variante a) unsicher. Das führt in diesem Falle dazu,

daß auch die Quotienten (6. Spalte der genannten Tabelle) mit einer größeren Unsicherheit behaftet sind als eine Einheit der letzten Stelle (vgl. den entsprechenden Abschnitt der Einleitung).

4. Die Ergebnisse der Experimente können anschließend genutzt werden, um die spezifische Wärmekapazität von Wasser zu bestimmen.

Das soll für die Variante b gezeigt werden.

Aus der Meßwertetabelle zu Versuch 1 kann man entnehmen:

$$\frac{W_w}{\Delta\theta} = 2,7 \frac{\text{kWs}}{\text{K}} \quad \text{und}$$

$$m = 600 \text{ g.}$$

Wegen

$$c = \frac{W_w}{m \cdot \Delta\theta} \quad \text{ergibt sich}$$

$$c = \frac{2,7 \text{ kWs}}{0,6 \text{ kg} \cdot \text{K}}, \quad \text{so daß}$$

$$c = 4,5 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}.$$

Der Tabellenwert beträgt  $4,187 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ .

Aus der Meßwertetabelle zu Versuch 2 kann man entnehmen:

$$\frac{W_w}{m} = 0,060 \frac{\text{kWs}}{\text{g}} \quad \text{und}$$

$$\Delta\theta = 14 \text{ K.}$$

Wegen

$$c = \frac{W_w}{m \cdot \Delta\theta} \quad \text{ergibt sich}$$

$$c = \frac{60 \text{ Ws}}{14 \text{ g} \cdot \text{K}}, \quad \text{so daß}$$

$$c = 4,3 \frac{\text{Ws}}{\text{g} \cdot \text{K}},$$

$$c = 4,3 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}.$$

Dieser Wert weicht nur um etwa 3% vom bekannten Wert ab.

### 1.3.2. Experimente zur Einführung der spezifischen Wärmekapazität

Zu Variante a

1. 2 Bechergläser (600 ml)
2. Öl
3. 2 Tauchsieder (300 W)
4. 2 Thermometer (0 °C bis 100 °C)
5. Präzisionswaage
6. Wägesatz
7. Unterlage
8. Rührer

*Zu Variante b*

- Geräte 3. bis 8., außerdem  
 9. 2 Bechergläser (1000 ml)  
 10. Eisenkörper (500 g)

*Methodische Hinweise*

1. Für beide Varianten ist zu empfehlen, die zwei verschieden gefüllten Bechergläser gleichzeitig zu erwärmen und dazu Tauchsieder gleicher Leistung zu benutzen.
2. Da man mit relativ geringer Temperaturerhöhung arbeiten kann, ist es möglich, die Abgabe von Wärmeenergie an die Umgebung so gering zu halten, daß es nicht nötig ist, ein Kalorimeter zu verwenden.

*Variante a*

Mit Hilfe der Präzisionswaage werden in die Bechergläser 400 g Wasser bzw. 400 g Öl eingewogen. Nachdem die Temperatur beider Flüssigkeiten gemessen wurde, werden die Tauchsieder für 2 Minuten eingeschaltet. Die Flüssigkeiten werden gut umgerührt, und die Endtemperatur wird gemessen. Die Temperaturdifferenz des Wassers beträgt etwa 21 K, die des Öls etwa 40 K (je nachdem, welche Ölsorte zur Verfügung steht).

Öl nimmt nur etwa die Hälfte der Wärmeenergie auf wie Wasser gleicher Masse bei gleicher Temperaturerhöhung.

Damit wird die physikalische Bedeutung des Faktors  $c$  in der Gleichung

$$W_w = c \cdot m \cdot \Delta\theta$$

erkannt.

Man kann die Meßergebnisse wie folgt weiter auswerten:

*Wasser*

Gegeben:

$$W_w = 36 \text{ kW s}$$

$$m = 400 \text{ g}$$

$$\Delta\theta = 21 \text{ K}$$

Gesucht:

$$c_{H_2O}$$

*Öl*

Gegeben:

$$W_w = 36 \text{ kW s}$$

$$m = 400 \text{ g}$$

$$\Delta\theta = 40 \text{ K}$$

Gesucht:

$$c_{Öl}$$

Lösung:

$$c = \frac{W_w}{m \cdot \Delta\theta}$$

$$c_{H_2O} = 4,3 \frac{\text{Ws}}{\text{g} \cdot \text{K}}$$

$$c_{H_2O} = \underline{\underline{4,3 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}}}$$

Lösung:

$$c = \frac{W_w}{m \cdot \Delta\theta}$$

$$c_{Öl} = 2,2 \frac{\text{Ws}}{\text{g} \cdot \text{K}}$$

$$c_{Öl} = \underline{\underline{2,2 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}}}$$

Variante b

In das eine Becherglas werden 1000 g Wasser, in das andere, das den Eisenkörper enthält, 500 g Wasser eingewogen (Abb. 1.3.2./1). Um eine günstige Eintauchtiefe der Tauchsieder zu erhalten, werden hinreichend weite Bechergläser benutzt, wobei darauf geachtet wird, daß das Eisenstück nicht aus dem Wasser herausragt. Nach der Messung der Ausgangstemperatur werden beide Tauchsieder für 3 Minuten eingeschaltet, die Flüssigkeiten mit den Tauchsiedern gut umgerührt und die Endtemperaturen ermittelt. Die Temperaturdifferenzen betragen etwa 12,5 K bzw. 22,5 K.

Bei gleicher Temperaturänderung nimmt das Eisenstück demnach weit weniger Wärme auf als Wasser gleicher Masse.

Nachdem die Größe  $c$  als spezifische Wärmekapazität eingeführt wurde, können die gefundenen Meßwerte wie folgt ausgewertet werden:

In beiden Fällen wurde eine Wärmeenergie von 54 kW<sub>s</sub> aufgenommen.

Für das Wasser im ersten Gefäß gilt:

Gegeben:

$$m = 1000 \text{ g}$$

$$W_w = 54 \text{ kW}_s$$

$$\Delta\vartheta = 12,5 \text{ K}$$

Gesucht:

$$c_{\text{H}_2\text{O}}$$

Nun erfolgt die Berechnung der Wärmeenergie, die das Wasser im zweiten Gefäß aufgenommen hat:

Gegeben:

$$m = 500 \text{ g}$$

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = 4,3 \frac{\text{Ws}}{\text{g} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta\vartheta = 22,5 \text{ K}$$

Gesucht:

$$W_w$$

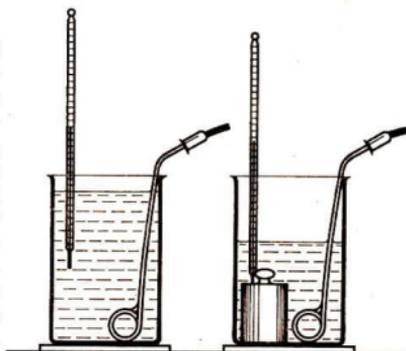


Abb. 1.3.2./1 Erwärmen von 1000 g Wasser sowie von 500 g Wasser und 500 g Eisen zur Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Eisen

Lösung:

$$c = \frac{W_w}{m \cdot \Delta\vartheta}$$

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = 4,3 \frac{\text{Ws}}{\text{g} \cdot \text{K}} = 4,3 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Lösung:

$$W_w = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta$$

$$W_w = 48,4 \text{ kW}_s = 48,4 \text{ kJ}$$

Das Eisenstück im zweiten Gefäß hat danach eine Wärmeenergie von 5,6 kWs (Differenz zwischen 54 kWs und 48,4 kWs) aufgenommen. Mittels dieses Wertes läßt sich die spezifische Wärmekapazität von Eisen berechnen:

Gegeben:

$$m = 500 \text{ g}$$

$$\Delta\vartheta = 22,5 \text{ K}$$

$$W_w = 5,6 \text{ kWs}$$

Gesucht:

$$c_{\text{Fe}}$$

Lösung:

$$c = \frac{W_w}{m \cdot \Delta\vartheta}$$

$$c_{\text{Fe}} = 0,50 \frac{\text{Ws}}{\text{g} \cdot \text{K}} = 0,50 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

*Bemerkung*

Vergleiche Bem. 3. V 1.3.1.!



### 1.3.3. Experimente mit dem Langbrenner [SE]

1. Langbrenner für Stadtgas
2. 3 Bechergläser (400 ml)
3. 3 Thermometer (0 °C bis 100 °C)
4. Zentraluhr oder 3 Uhren mit Sekundenzeigern oder 3 Stoppuhren
5. 3 Rührer
6. Öl
7. Tafelwaage

*Methodische Hinweise*

1. In Analogie zum Versuch 1.3.1., bei dem mit Tauchsiedern gearbeitet wird, können mit dem Langbrenner Experimente zur Gleichung für die Wärmemenge ausgeführt werden.

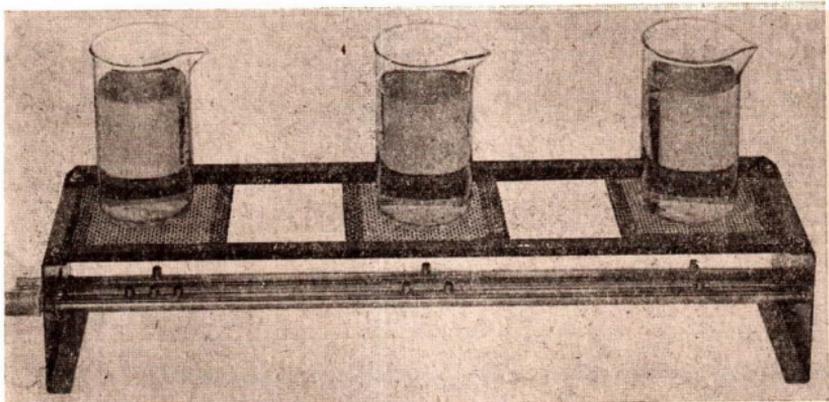


Abb. 1.3.3./1 Langbrenner für Stadtgas

2. Da beim Langbrenner drei Brennstellen (wahlweise mit gleicher oder mit unterschiedlicher Leistung) gleichzeitig zur Verfügung stehen (Abb. 1.3.3./1), eignet er sich für Parallelversuche, wenn auch der Platz für die experimentierenden Schüler etwas beengt ist.
3. Die Wärmeabgabe der Brenner ist Schwankungen unterworfen, die z. B. vom Gasdruck abhängig sind. Ihre Leistung ist nicht konstant und müßte daher jedesmal neu bestimmt werden, wenn die Experimente quantitativ ausgewertet werden sollen. Das ist aber nicht nötig. Man kann mit behelfsmäßigen Einheiten (bE) für die Wärmemenge arbeiten. Deshalb sollten mit dem Langbrenner nur Verhältnisse bzw. Proportionalitäten ermittelt werden.
4. Es empfiehlt sich, Wasser oder andere Flüssigkeiten in die Bechergläser zu geben, deren Temperatur unterhalb der Zimmertemperatur liegt, und mit der Erfassung der Meßwerte für die Temperatur immer dann zu beginnen, wenn sie 20 °C erreicht hat. Das ist insbesondere bei der Variante a wichtig, weil dann die entsprechende Meßwertetabelle sowie die grafische Darstellung übersichtlicher sind.
5. Vergleiche MH Nr 4. und 5. V 1.3.1.!

*Variante a*

*Versuch 1*

3 Schülergruppen ermitteln auf den drei Einzelbrennstellen für 100 g bzw. 200 g bzw. 300 g Wasser den Temperaturverlauf beim Erwärmen in Abhängigkeit von der Zeit. Sobald das Wasser 20 °C erreicht hat, werden in regelmäßigen Zeitabständen die Temperaturen abgelesen und tabelliert.

*Beispiel einer Meßwertetabelle*

$t$ in min	$W_w$ in bE	$m$ in g	$\vartheta$ in °C	$\Delta\vartheta$ in K	$\frac{W_w}{\Delta\vartheta}$ in $\frac{\text{bE}}{\text{K}}$
0,0	0,0	100	20	—	—
1,5	1,5	100	32	12	0,12
3,0	3,0	100	45	25	0,12
4,5	4,5	100	57	37	0,12
0	0,0	200	20	—	—
1,5	1,5	200	25,5	5,5	0,27
3,0	3,0	200	32	12	0,25
4,5	4,5	200	38	18	0,25
0	0,0	300	20	—	—
1,5	1,5	300	24	4	0,38
3,0	3,0	300	28	8	0,38
4,5	4,5	300	31,5	11,5	0,39

Aus der grafischen Darstellung (Abb. 1.3.3./2) kann erkannt werden:

$$W_w \sim \Delta\vartheta, \text{ für } m = \text{konstant}, \text{ und } W_w \sim m, \text{ für } \Delta\vartheta = \text{konstant}.$$

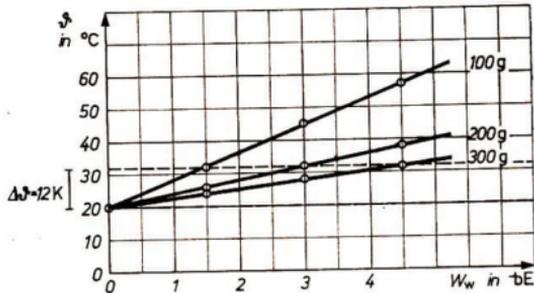


Abb. 1.3.3./2 Temperatur-Wärmemenge-Diagramm zur Variante a

Die Werte der letzten Spalte der Tabelle bestätigen die Proportionalität

$$W_w \sim \Delta\theta, \text{ für } m = \text{konstant.}$$

Die nachträglich durch Fettdruck in der Tabelle hervorgehobenen Werte lassen erkennen:

$$W_w \sim m, \text{ für } \Delta\theta = \text{konstant.}$$

#### Versuch 2

Vergleiche Versuch 1.3.1. Es werden etwa je 200 g Öl und Wasser abgefüllt und über je einer Einzelbrennstelle erwärmt.

#### Variante b

#### Versuch 1

Drei Schülergruppen ermitteln für 300 g Wasser die Temperaturerhöhung, die nach einer bestimmten Zeit erreicht wird, wenn die einfache, doppelte oder dreifache Wärmeenergie zugeführt wird. Dazu werden die Einfach-, die Doppel- und die Dreifach-Brennstelle des zweiten Brennröhres vom Langbrenner genutzt.

#### Beispiel einer Meßwertetabelle

$m = 300\text{g}$

Anzahl der Brenner	$t$ in min	$W_w$ in bE	$\Delta\theta$ in K	$\frac{W_w}{\Delta\theta}$ in $\frac{\text{bE}}{\text{K}}$
1	5	5	3,5	1,4
2	5	10	7	1,4
3	5	15	10	1,5

Daraus folgt:  $W_w \sim \Delta\theta$ , für  $m = \text{konstant}$ .

#### Versuch 2

Drei Schülergruppen ermitteln für 100 g bzw. 200 g bzw. 300 g Wasser die Zeit – und damit indirekt die Wärmeenergie –, die jeweils benötigt wird, um eine bestimmte Temperaturdifferenz, z. B. 10 K, zu erreichen.

Dazu werden zweckmäßigerweise wiederum die Einfach-, die Doppel- und die Dreifach-Brennstelle des Langbrenners benutzt.

Beispiel einer Meßwertetabelle

$\Delta\theta = 10\text{K}$

Anzahl der Brenner	$t$ in s	$W_w$ in bE	$m$ in g	$\frac{W_w}{m}$ in $\frac{\text{bE}}{\text{g}}$
1	390	6,5	100	0,065
2	405	13,5	200	0,068
3	400	20,0	300	0,067

Daraus folgt:

$$W_w \sim m, \text{ für } \Delta\theta = \text{konstant.}$$

Die grafischen Darstellungen zu den Versuchen 1 und 2 dieser Variante sind in Abbildung 1.3.3./3 ausgewiesen.

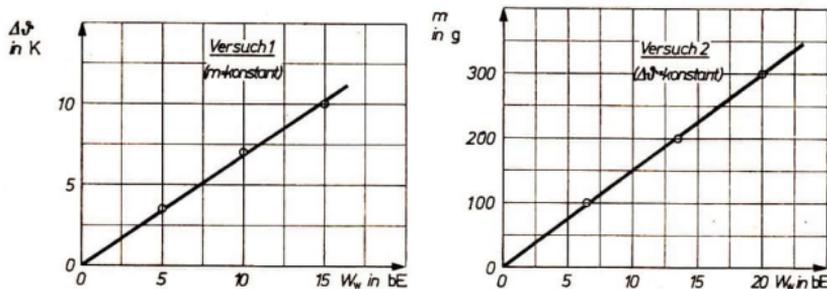


Abb. 1.3.3./3 Grafische Darstellung der Meßwerte zu den Versuchen 1 und 2 der Variante b

Versuch 3

Vergleiche Versuch 2 der Variante a.

Bemerkungen

1. Der Langbrenner darf nur mit Stadtgas betrieben werden.
2. Solange der Langbrenner in Betrieb ist, sollten keine stärkeren Luftbewegungen im Experimentierraum auftreten, um größere Meßfehler zu vermeiden.
3. Falls die Einzelbrennstellen verschiedene Leistungen haben, setze man bei Variante a, Versuch 1, das Becherglas mit 100 g Wasser auf die Brennstelle mit der größten Leistung, da hier die größte Temperaturerhöhung und deshalb auch die größte Wärmeenergieabgabe vom Gefäß an die Umgebung stattfindet.

### 1.3.4. Spezifische Wärmekapazität fester Stoffe [SE]

1. Becherglas (600 ml)
2. Becherglas (800 ml)
3. Korkscheiben
4. Kartondeckel mit Schlitz
5. Rührer
6. Reagenzglas (Ø 16 mm)
7. kleine Eisennägel (Drahtstifte),  
Glasperlen, Bleischrot; je 200 g
8. Erlenmeyerkolben
9. Watte
10. Reagenzglashalter
11. Stativheizplatte
12. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
13. Präzisionswaage
14. Wägesatz

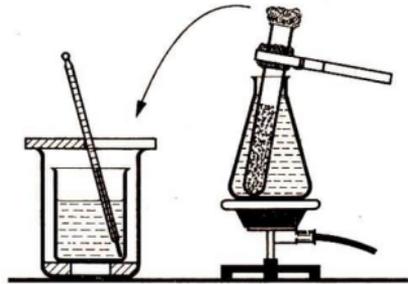


Abb. 1.3.4./1 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität fester Stoffe

#### Versuchsanordnung

In das innere Gefäß des behelfsmäßigen Kalorimeters gibt man eine bestimmte Wassermenge und mißt deren Temperatur. In einem großen Reagenzglas werden kleine Eisennägel bestimmter Masse im Wasserbad bis zur Siedetemperatur des Wassers erwärmt. Die Öffnung verschließt man mit einem Wattebausch, damit die Nägel während des Experiments trocken bleiben. Unter den Reagenzglashalter klemmt man zum Schutz gegen herabtropfendes Wasser einen Wattering (Abb. 1.3.4./1).

#### Versuch

Nachdem die Nägel die Siedetemperatur des Wassers erreicht haben, schüttet man sie unverzüglich in das mit Wasser gefüllte Kalorimeter. Es ist streng darauf zu achten, daß dabei kein heißes Wasser in das Kalorimeter tropft. Man rührt gut um und mißt die Mischungstemperatur.

#### Gang der Messung

1. Masse  $m_{\text{H}_2\text{O}}$  des Wassers
2. Masse  $m_{\text{Fe}}$  der Eisennägel
3. Temperatur  $\vartheta_{\text{H}_2\text{O}}$  des Wassers
4. Temperatur  $\vartheta_{\text{Fe}}$  der Eisennägel
5. Mischungstemperatur  $\vartheta_{\text{m}}$

#### Berechnung von $c_{\text{Fe}}$ :

$$m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} (\vartheta_{\text{m}} - \vartheta_{\text{H}_2\text{O}}) = m_{\text{Fe}} \cdot c_{\text{Fe}} \cdot (\vartheta_{\text{Fe}} - \vartheta_{\text{m}}),$$

$$c_{\text{Fe}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (\vartheta_{\text{m}} - \vartheta_{\text{H}_2\text{O}})}{m_{\text{Fe}} (\vartheta_{\text{Fe}} - \vartheta_{\text{m}})}.$$

Es ergibt sich ein Wert von ungefähr  $0,4 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ , der etwas kleiner ist als der

Tabellenwert von  $0,46 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}}$ , da die Wärmeabgabe an das Gefäß nicht berücksichtigt wurde. Ebenso kann man auch die spezifische Wärmekapazität anderer fester Stoffe und des Quecksilbers bestimmen.

### 1.3.5. Spezifische Wärmekapazität flüssiger Stoffe

1. Großes Dewar-Gefäß
2. Thermometer (0 °C bis 100 °C; Teilung  $\frac{1}{10}$  K)
3. Präzisionswaage
4. Wägesatz
5. 2 Bechergläser (600 ml)
6. Tauchsieder
7. Tetrachlorkohlenstoff
8. Brennspritus

#### Versuch

Ein Dewar-Gefäß wird mit Wasser, dessen Masse vorher gemessen wurde, gefüllt. Man senkt einen Tauchsieder hinein und stellt die Temperatur fest. Danach schaltet man den Strom für genau 30 Sekunden ein und mißt die Temperaturzunahme. Das Gefäß wird entleert und sorgfältig gereinigt.

Anschließend wird eine Flüssigkeit mit einer größeren Dichte als Wasser, zum Beispiel Tetrachlorkohlenstoff (Dichte  $\rho = 1,59 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ), aber mit gleicher Masse, in das Kalorimeter gegossen (Abb. 1.3.5./1).

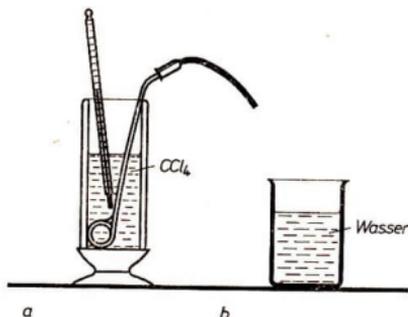


Abb. 1.3.5./1 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität von Tetrachlorkohlenstoff durch Erwärmen von Tetrachlorkohlenstoff und Wasser in einem Dewar-Gefäß

Wieder schaltet man den Strom für genau 30 Sekunden ein und liest die Temperaturzunahme des Tetrachlorkohlenstoffs ab. Die vom Tauchsieder abgegebene Wärmeenergie wird durch die vom Wasser aufgenommene Wärmeenergie gemessen. Daraus läßt sich die spezifische Wärmekapazität des Tetrachlorkohlenstoffs  $c_{\text{Tet}}$  berechnen.

#### Gang der Messung

1. Masse  $m$  des Tetrachlorkohlenstoffs und des Wassers
2. Anfangstemperatur  $\vartheta_1$  des Wassers
3. Endtemperatur  $\vartheta_2$  des Wassers
4. Temperaturzunahme  $\Delta\vartheta_{\text{H}_2\text{O}} = \vartheta_2 - \vartheta_1$  des Wassers
5. Anfangstemperatur  $\vartheta_3$  des Tetrachlorkohlenstoffs
6. Endtemperatur  $\vartheta_4$  des Tetrachlorkohlenstoffs
7. Temperaturzunahme  $\Delta\vartheta_{\text{Tet}} = \vartheta_4 - \vartheta_3$  des Tetrachlorkohlenstoffs

8. vom Tauchsieder abgegebene Wärmeenergie:  $W_{w1} = m \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta\vartheta_{H_2O}$   
 9. vom Tetrachlorkohlenstoff aufgenommene Wärmeenergie:

$$W_{w2} = m \cdot c_{Tet} \cdot \Delta\vartheta_{Tet}$$

Durch Gleichsetzen erhält man

$$m \cdot c_{Tet} \cdot \Delta\vartheta_{Tet} = m \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta\vartheta_{H_2O},$$

$$c_{Tet} = \frac{c_{H_2O} \cdot \Delta\vartheta_{H_2O}}{\Delta\vartheta_{Tet}}.$$

Man erhält

$$c_{Tet} = 1,0 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} \quad \text{oder} \quad c_{Tet} = 1,0 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}.$$

*Anwendung auf andere Flüssigkeiten*

Nach demselben Verfahren kann man die spezifische Wärmekapazität anderer Flüssigkeiten ermitteln, z. B. die von Brennspritus. Da dessen Dichte kleiner ist als die des Wassers, nämlich  $\rho = 0,79 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , gießt man zuerst den Brennspritus in das Dewar-Gefäß. Man findet für die spezifische Wärmekapazität des Brennspritus:

$$c_{Br} = 2,9 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}.$$

Dieser Wert liegt etwas höher als der Tabellenwert für  $c_{\text{Äthanol}}$  ( $2,3 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ), da Brennspritus noch etwa 7% Wasser und Fuselöle enthält.

*Berücksichtigung der Wärmekapazität des Dewar-Gefäßes*

Man kann die Genauigkeit der Messungen noch dadurch erhöhen, daß man vorher die Wärmekapazität  $C$  des Dewar-Gefäßes nach V 1.3.6. ermittelt und bei der Berechnung von  $c$  berücksichtigt. Dann gilt für eine beliebige Flüssigkeit (Fl):

$$(m \cdot c_{Fl} + C) \Delta\vartheta_{Fl} = (m \cdot c_{H_2O} + C) \Delta\vartheta_{H_2O},$$

$$c_{Fl} = \frac{c_{H_2O} \cdot \Delta\vartheta_{H_2O}}{\Delta\vartheta_{Fl}} + \frac{C}{m} \cdot \frac{\Delta\vartheta_{H_2O} - \Delta\vartheta_{Fl}}{\Delta\vartheta_{Fl}}.$$

*Bemerkungen*

1. Die Temperatur darf nicht über 50 °C bis 60 °C hinaus gesteigert werden, da die Siedetemperaturen des Tetrachlorkohlenstoffs und des Äthanol bei 77 °C beziehungsweise bei 78 °C liegen.
2. Die Heizwendel des Tauchsieders muß vollständig von den Flüssigkeiten umgeben sein.

### 1.3.6. Wärmekapazität eines Dewar-Gefäßes [SE]

- |  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. Großes Dewar-Gefäß (750 ml)                             | 5. Schüssel                   |
| 2. Tauchsieder   | 6. Becherglas (600 ml)        |
| 3. Thermometer (0 °C bis 100 °C; Teilung $\frac{1}{10}$ K) | 7. Präzisionswaage            |
| 4. Becherglas (1000 ml)                                    | 8. Wägesatz (100 g bis 10 kg) |
|  | 9. Wägesatz (1 mg bis 200 g)  |

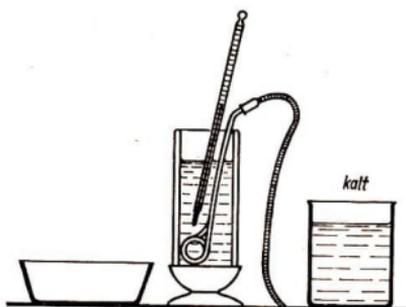


Abb. 1.3.6./1 Wärmeabgabe durch die innere Wand

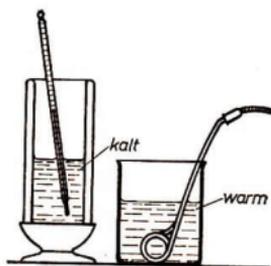


Abb. 1.3.6./2 Mischen von Wasser im Dewar-Gefäß

*Variante a: Wärmeabgabe durch das Gefäß*

In einem Becherglas wird kaltes Wasser bereitgestellt; seine Temperatur wird gemessen. Das Dewar-Gefäß wird mit Wasser gefüllt und durch einen hineingestellten Tauchsieder erwärmt. Die Endtemperatur, die wegen der Gefahr des Zerspringens nicht über 60 °C liegen darf, wird festgestellt. Danach wird das Gefäß rasch entleert und sogleich mit dem bereitgestellten kalten Wasser gefüllt (Abb. 1.3.6./1). Es wird gut umgerührt und dabei die Temperaturzunahme gemessen. Zum Schluß wird das Dewar-Gefäß mit dem kalten Wasser und ohne dieses gewogen und so die Masse des Wassers ermittelt.

*Gang der Messung*

1. Temperatur  $\vartheta_1$  des kalten Wassers vor dem Hineingießen
2. Temperatur  $\vartheta_2$  des warmen Wassers und des Gefäßes
3. Temperatur  $\vartheta_m$  des Wassers nach dem Hineingießen
4. Masse  $m$  des kalten Wassers

Die Wärmekapazität ergibt sich durch Gleichsetzen der vom Gefäß abgegebenen und der vom kalten Wasser aufgenommenen Wärmeenergie, wobei  $c_{\text{H}_2\text{O}}$  die spezifische Wärmekapazität des Wassers bedeutet:

$$C \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_m) = m \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (\vartheta_m - \vartheta_1).$$

Somit ist

$$C = \frac{m \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (\vartheta_m - \vartheta_1)}{\vartheta_2 - \vartheta_m}.$$

*Variante b: Mischen von warmem mit kaltem Wasser im Dewar-Gefäß; Wärmeaufnahme durch das Gefäß*

In dem Dewar-Gefäß werden zwei gleich große Wassermengen gemischt. Das warme Wasser wird zum kalten in das Dewar-Gefäß gegossen (Abb. 1.3.6./2). Die Mischungstemperatur liegt etwas unterhalb des Mittelwertes aus beiden Temperaturen. Dies ist der Aufnahme von Wärmeenergie durch die Gefäßwand zuzuschreiben. Man kann auf diese Weise die Wärmekapazität  $C$  des Gefäßes errechnen.

*Gang der Messung*

1. Masse  $m$  des warmen und des kalten Wassers
2. Temperatur  $\vartheta_2$  des warmen Wassers
3. Temperatur  $\vartheta_1$  des kalten Wassers
4. Mischungstemperatur:  $\vartheta_m < \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2}$

Unter Berücksichtigung der Wärmekapazität besteht die Gleichung

$$(m \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} + C) \cdot (\vartheta_m - \vartheta_1) = m \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_m);$$

$$C = m \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2 - 2\vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_1}.$$

In beiden Fällen ergibt sich für ein Dewar-Gefäß der angegebenen Größe eine Wärmekapazität von etwa  $70 \frac{\text{J}}{\text{K}}$ .

*Bemerkung*

Vergleiche Bem. V 1.3.7.!

### 1.3.7. Wärmekapazität eines Kalorimetergefäßes aus Metall oder Glas [SE]

1. Kalorimeter
2. Präzisionswaage
3. Wägesatz

*Versuch*

Das Innengefäß eines Kalorimeters wird herausgenommen und abgewogen (Abb. 1.3.7./1). Seine Masse wird mit der spezifischen Wärmekapazität des Materials multipliziert. Das Produkt ist gleich der Wärmekapazität des Gefäßes.

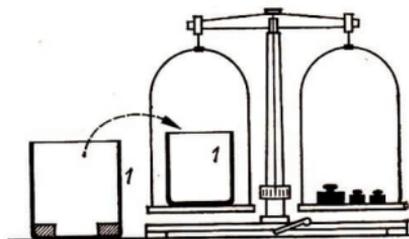


Abb. 1.3.7./1 Wägung des Kalorimetergefäßes

*Beispiel*

Masse des Kalorimetergefäßes aus Messing  $m = 76 \text{ g}$

Spezifische Wärmekapazität des Messings  $c_{\text{Me}} = 0,37 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}}$

Somit ist die Wärmekapazität  $C$  des Gefäßes:

$$C = m \cdot c_{\text{Me}}.$$

$$C = 76 \text{ g} \cdot 0,37 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} = 28 \frac{\text{J}}{\text{K}}.$$

*Bemerkung*

Es empfiehlt sich, die Wärmekapazität eines Kalorimeters als Mittelwert aus einer Reihe von Messungen zu bestimmen und am Kalorimeter zu verzeichnen. Dann ist sie für Versuche jederzeit verfügbar.

### 1.3.8. Mischungstemperatur zweier verschieden temperierter Wassermengen [SE]

- |                                       |                                  |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| 1. Becherglas (250 ml)                | 5. Meßzylinder                   |
| 2. Becherglas (100 ml)                | 6. Thermometer (0 °C bis 100 °C) |
| 3. Unterlage aus Holz oder Polystyrol | 7. Rührer                        |
| 4. Stativheizplatte                   |                                  |

#### Methodischer Hinweis

Für den Versuch 1, bei dem unterschiedliche Wassermengen vermischt werden, gibt es mehrere Möglichkeiten: Man kann entweder die größere oder die kleinere Wassermenge erwärmen und man kann ferner entweder die heißere zur kälteren Wassermenge schütten oder umgekehrt. Das Gefäß, in dem das Mischen geschieht, gibt daher entweder relativ viel oder wenig Wärmeenergie ab bzw. nimmt relativ viel oder wenig Wärmeenergie auf.

Um die Abgabe von Wärmeenergie an die Umgebung so weit wie möglich zu kompensieren, sollte man die kleinere Wassermenge erwärmen und die größere kalte Wassermenge zu der kleineren heißen schütten.

#### Versuch 1

Zwei verschiedene Wassermengen werden abgemessen, die kleinere wird erwärmt. Nachdem man die Temperaturen gemessen hat, gießt man das kalte Wasser (z. B.  $\vartheta_k = 20\text{ °C}$ ) in das heiße (z. B.  $\vartheta_h = 70\text{ °C}$ ), rührt gut um und liest dann die Mischungstemperatur  $\vartheta_m$  ab (Abb. 1.3.8./1).

Die Berechnung der Mischungstemperatur erfolgt nach der Richmannschen Mischungsregel

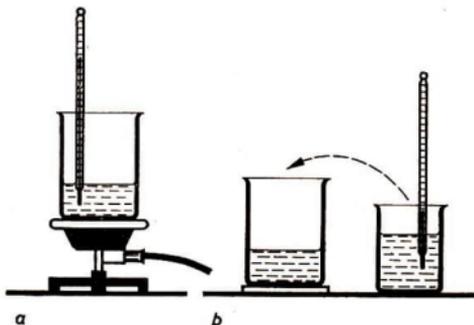


Abb. 1.3.8./1 Mischen einer heißen Wassermenge mit einer größeren Menge kalten Wassers

$$\vartheta_m = \frac{m_h \cdot c_h \cdot \vartheta_h + m_k \cdot c_k \cdot \vartheta_k}{m_h \cdot c_h + m_k \cdot c_k},$$

wobei in diesem Falle wegen  $c_h = c_k$  gilt:

$$\vartheta_m = \frac{m_h \cdot \vartheta_h + m_k \cdot \vartheta_k}{m_h + m_k}.$$

#### Beispiel

$$m_h = 50 \text{ g}$$

$$\vartheta_h = 60 \text{ °C}$$

$$m_k = 150 \text{ g}$$

$$\vartheta_k = 23 \text{ °C}$$

$$\vartheta_m = 33 \text{ °C (experimentell ermittelter Wert)}$$

Nach Einsetzen in die obige Gleichung ergibt sich ohne Berücksichtigung von  $C$ :

$$\vartheta_m = 32,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

In diesem Fall ist der experimentell ermittelte Wert für  $\vartheta_m$  etwas größer als der berechnete.

Will man den Einfluß des Gefäßes auf die Mischungstemperatur berücksichtigen, dann muß man die Wärmekapazität

$$C = m_{\text{Glas}} \cdot c_{\text{Glas}}$$

des Becherglases errechnen, in dem gemischt wird. In unserem Falle muß zum Produkt  $m_h \cdot c_h$  die Größe  $C$  addiert werden, so daß

$$\vartheta_m = \frac{(m_h \cdot c_h + C)\vartheta_h + m_k \cdot c_k \cdot \vartheta_k}{m_h \cdot c_h + m_k \cdot c_k}.$$

### Versuch 2

Unter Benutzung der beiden Bechergläser werden zwei gleich große Wassermengen abgewogen. Die eine Wassermenge in dem Becherglas für 250 ml wird erwärmt. Nachdem die Temperaturen beider Wassermengen gemessen worden sind, wird das kalte Wasser zum heißen Wasser gegossen, sorgfältig umgerührt und die Mischungstemperatur ermittelt.

Da in diesem Falle die Beziehungen

$$m_h = m_k \text{ und}$$

$$c_h = c_k$$

gelten, folgt aus der Richmannschen Mischungsregel unter Vernachlässigung der Wärmekapazität des Gefäßes:

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_h + \vartheta_k}{2}.$$

### Beispiel

$$m_k = m_h = 100 \text{ g}$$

$$\vartheta_k = 24,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_h = 67 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_m = 45 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (experimentell ermittelter Wert)}$$

Nach Einsetzen in obige Gleichung ergibt sich:

$$\vartheta_m = 45,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

In diesem Falle liegt der experimentell ermittelte Wert für  $\vartheta_m$  unter dem berechneten.

### Bemerkung

Es ist günstig, das Mischen in der empfohlenen Weise durchzuführen; jedoch muß dann zur Messung von  $\vartheta_m$  das Thermometer aus dem kalten Wasser genommen werden, damit  $\vartheta_m$  als maximal angezeigte Temperatur der Mischung ermittelt werden kann. (Das Thermometer darf also vor dem Messen von  $\vartheta_m$  keine höhere Temperatur anzeigen, sonst sinkt die Temperatur dauernd, bis das Wasser Zimmertemperatur erreicht hat.)

## 2. Volumenänderung der Körper bei Temperaturänderung

### 2.0. Methodische Bemerkungen

**2.0.0.** Die Volumenänderung von Körpern beim Ändern ihrer Temperatur erregt erfahrungsgemäß bei den Schülern starkes Interesse. Sie haben durch Beobachtungen in der Umwelt gewisse Vorkenntnisse erworben, verbinden aber im allgemeinen eine Temperaturerhöhung stets mit einer Volumen- bzw. Längenzunahme, eine Temperaturniedrigung mit einer Abnahme des Volumens bzw. der Länge. Deshalb sollte der Lehrer auch Experimente auswählen, die das gegenteilige Verhalten bestimmter Stoffe beweisen (V 2.1.2. und V 2.2.3.). Entsprechend den Aggregatzuständen fest, flüssig und gasförmig, die im Unterricht behandelt werden, gliedert sich dieses Kapitel in drei Abschnitte, in denen vorwiegend qualitative Experimente beschrieben sind.

**2.0.1.** Bei einer Anzahl von Versuchen zum Verhalten fester Körper bei Änderung der Temperatur sind Varianten angegeben, für die sich der Lehrer je nach den gegebenen Experimentiermöglichkeiten entscheiden kann. Einige Versuche sind auch als Hausexperimente geeignet.

Der Versuch 2.1.1. enthält vier Varianten und beschränkt sich auf das Verhalten von *Metallen* bei Temperaturänderung. Die Schüler nehmen aktiv am Unterrichtsgeschehen teil, wenn die Versuche überzeugend dargestellt werden, wie z.B. mit Hilfe des Schattenwurfs bei Variante a. Die Variante b sollte aus Zeitgründen nur genutzt werden, wenn Gas als Wärmequelle vorhanden ist.

Der Versuch 2.1.2. zeigt das Verhalten von *Nichtmetallen* bei Temperaturänderung. Dadurch wird das Wissen der Schüler über das thermodynamische Verhalten von Körpern erweitert. Es ist zu zeigen, daß nicht bei allen Körpern das Volumen bzw. die Länge bei Erwärmung größer wird.

Da Nichtmetalle, speziell Plaste, in unserem Leben eine immer größere Rolle spielen, ist zu empfehlen, außer dem Verhalten von Glas auch das von Plasten zu zeigen.

Eine wesentliche Bedeutung für die Praxis besitzt die mit der Volumenänderung verbundene Kraftwirkung. Die drei Varianten des Versuchs 2.1.3. sind geeignet, die großen Kräfte zu verdeutlichen, die bei Temperaturschwankungen an Körpern auftreten können. Die Notwendigkeit von Dehnungsausgleichern bei Rohrleitungen wird ersichtlich. Die Variante c veranschaulicht die Wirkungsweise des Dehnungsausgleichers. Sie kommt der Praxis noch näher, wenn man statt des Drahtmodells eine etwa 1000 mm lange Glasröhre wählt.

Die Anwendung von Bimetallstreifen wird durch die Versuche 2.1.4., 2.1.5. und 2.1.6. gezeigt. Der Versuch 2.1.4. macht die Funktionsweise eines Bimetallstreifens

im Vergleich mit einem Streifen aus 2 vernieteten Blechstreifen gleichen Materials deutlich. Es erweist sich als methodisch günstig, beide Teilversuche zu demonstrieren.

Die Versuche 2.1.5. und 2.1.6. veranschaulichen die Verwendung des Bimetallstreifens zum Auslösen eines elektrischen Signals bzw. bei einem Regelungsvorgang.

**2.0.2.** Die Versuche 2.2.1. und 2.2.2. sind besonders zur Motivation geeignet. Sie können mit Hilfe der Schüler aufgebaut und mit ihnen ausgewertet werden und bereiten keine größeren experimentellen Schwierigkeiten.

Nicht zur vollen Zufriedenheit gelingen oft die Versuche 2.2.3. und 2.2.4. Beide beanspruchen einen erheblichen Zeitaufwand in der Vorbereitung und der Durchführung. Das Wasser erreicht seine größte Dichte anscheinend erst bei einer Temperatur über  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , etwa bei  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , weil es nicht gelingt, die Ausdehnung der Glasgefäße zu kompensieren. Man sollte zunächst den Versuch 2.2.3. durchführen, den Schülern die genauen Werte für die Anomalie des Wassers mitteilen und anschließend Versuch 2.2.4. vorführen.

Der einzige quantitative Versuch innerhalb dieses Abschnittes ist 2.2.5. Er ist gut als Schülerexperiment in getrennt-gemeinschaftlicher Arbeitsweise einzusetzen und auch für die Tätigkeit in einer Arbeitsgemeinschaft geeignet. Das Kalibrieren hat sehr sorgfältig zu geschehen; die Schülergruppen können mit unterschiedlichen Flüssigkeiten arbeiten. Hiermit ergibt sich für den Lehrer eine Möglichkeit, kollektive Arbeitsformen zu planen.

**2.0.3.** Der Abschnitt 2.3. bringt eine Auswahl möglicher Experimente zur Volumen- und Druckänderung gasförmiger Körper bei Temperaturänderungen.

Im Mittelpunkt der Betrachtungen steht die Zustandsgleichung des idealen Gases mit ihren Sonderfällen. Ein besonders übersichtlicher und effektiver Versuchsaufbau wird mit dem  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät ermöglicht (vgl. V 2.3.4.).

Neben der Ermittlung der Zusammenhänge zwischen dem Druck  $p$ , dem Volumen  $V$  und der Temperatur  $T$  werden der Ausdehnungskoeffizient und der Spannungskoeffizient von Gasen bestimmt. Mit dem  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät erzielt man bei allen Experimenten überzeugende Ergebnisse. Steht dieses Gerät nicht zur Verfügung, dann bilden die Versuche 2.3.6. und 2.3.7. eine hinreichend gute Möglichkeit, die Gesetze des idealen Gases zu erarbeiten bzw. zu bestätigen.

Der Versuch 2.3.5. dient dazu, die Zustandsgleichung des idealen Gases und die Sonderfälle modellmäßig zu untersuchen. Mit dem Gerät zur kinetischen Gastheorie können die zu behandelnden mikrophysikalischen Vorgänge in überzeugender Weise veranschaulicht werden.

Während die Versuche 2.3.4., 2.3.6. und 2.3.7. quantitativen Charakter tragen, sind die Versuche 2.3.1., 2.3.2. und 2.3.3. qualitative. Sie eignen sich gut, um die Schüler in die Problematik einzuführen. Mit einem sehr geringen Materialaufwand kann gezeigt werden, daß ein Zusammenhang zwischen den Zustandsgrößen  $p$ ,  $V$  und  $T$  eines Gases besteht. Diese Versuche sind immer eindrucksvoll, lassen sich gut beobachten und sind geeignet, bei den Lernenden Interesse für die Physik zu wecken.

## 2.1. Volumenänderung fester Körper

### 2.1.1. Volumenänderung von Metallen

*Zu Variante a*

1. Eisen- oder Kupferdraht (Länge etwa 1000 mm;  $\varnothing$  etwa 1 mm)
2. 2 Holztsche Klemmen
3. 2 Hakenkörper
4. Vertikalmaßstab mit Schiebezeiger
5. Physikleuchte
6. Bunsenbrenner oder Spirituslampe

*Zu Variante b*

Geräte 1. und 6., außerdem

7. Zeiger mit Zeigerhalter und Skale
8. Rolle

*Zu Variante c*

Gerät 6., außerdem

9. Metallstab oder dicker, gerader Draht
10. Trinkröhrchen (Strohalm oder Plaströhrchen)
11. Rasierklinge
12. Kerze
13. Brett oder kleiner Holzklotz

*Zu Variante d*

Gerät 6., außerdem

14. Kugel mit Ring

*Variante a: Ausdehnung eines zweiseitig fest eingespannten Drahtes*

*Methodischer Hinweis*

Dieser Versuch kann zur Einführung dienen. Mittels Schattenwurf einrichtung läßt sich besonders eindrucksvoll demonstrieren, daß Körper (z. B. Leitungsdrähte) bei Temperaturschwankungen ihre Länge ändern.

*Versuch*

Der Versuchsaufbau erfolgt gemäß Abbildung 2.1.1./1. Ein etwa 1 m langer Eisen- oder Kupferdraht wird an zwei Holztschen Klemmen befestigt und straff gespannt.

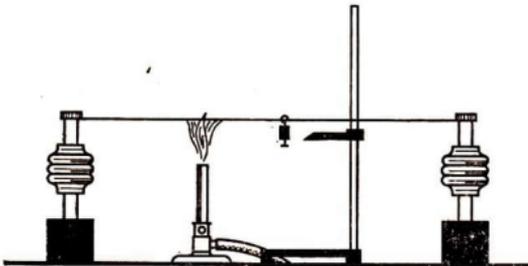


Abb. 2.1.1./1 Längenänderung eines zweiseitig fest eingespannten Drahtes

In die Mitte des Drahtes hängt man einen Hakenkörper. Die Höhe des Drahtes muß so gewählt werden, daß eine Physikleuchte, die ungefähr 1 m vor dem Hakenkörper steht, den Schatten genügend hoch an die Wand wirft. Ein Vertikalmaßstab mit Schiebezeiger ist so aufzustellen, daß die Zeigerspitze in Höhe einer Kante des Hakenkörpers steht. Wenn der Draht erwärmt wird, senkt sich der Hakenkörper; beim Abkühlen geht er in die Ausgangslage zurück.

*Variante b: Ausdehnung eines einseitig fest eingespannten Drahtes*

*Methodischer Hinweis*

Dieser Versuch kann sowohl zur Demonstration der Ausdehnung fester Körper beim Erwärmen als auch für die Erläuterung der Notwendigkeit einer Rollenlagerung von Körpern dienen, die Temperaturschwankungen unterworfen sind (z. B. Rollenlagerung bei Brücken; Spanneinrichtungen bei Oberleitungen).

*Versuch*

Die Versuchsanordnung wird nach Abbildung 2.1.1./2 aufgebaut. An die Achse der Rolle klemmt man einen Zeiger und stellt den Skalenhalter mit Skale dahinter.

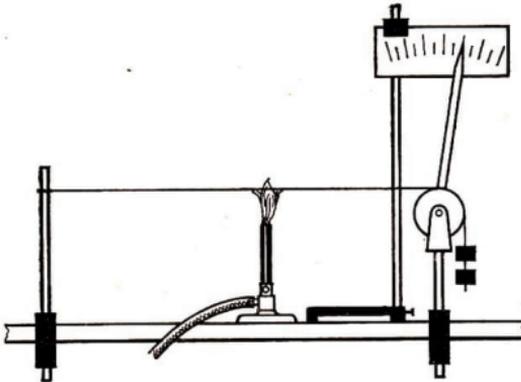


Abb. 2.1.1./2 Längenänderung eines einseitig fest eingespannten Drahtes

Wenn der Draht durch Entlangführen einer schwachen Bunsenbrennerflamme erwärmt wird, ist am Ausschlag des Zeigers deutlich eine zunehmende Verlängerung des Drahtes zu erkennen. Der Zeiger geht beim Abkühlen des Drahtes wieder in seine Ausgangsstellung zurück.

*Variante c: Ausdehnung eines Metallstabes*

*Methodischer Hinweis*

Der Versuch kann zur Einführung dienen. Unter Verwendung einer Schattenwurf-einrichtung wird die Auslenkung des Zeigers noch besser sichtbar.

*Versuch*

In einen Holzklötz wird eine Rasierklinge so eingeschoben, daß sie sich noch leicht verbiegen läßt. Auf die Rasierklinge legt man einen Metallstab, der an einem Ende mittels Stativmaterials fest verschraubt wird. Das Trinkröhrchen wird auf die Ra-

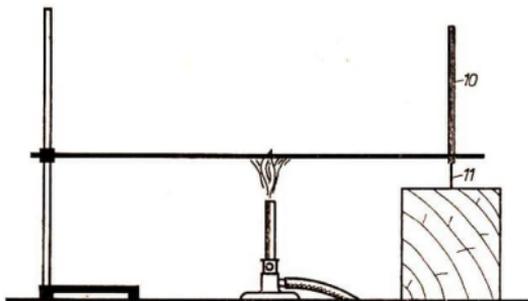


Abb. 2.1.1./3 Nachweis der Längenänderung eines Metallstabes durch einen Zeiger

Abb. 2.1.1./4 Kugel mit Ring



sierklinge gesteckt. Der Metallstab kann mit der Flamme eines Brenners oder einer Kerze erwärmt werden (Abb. 2.1.1./3). Der Stab dehnt sich beim Erwärmen aus. Dadurch verbiegt er die Rasierklinge. Das Trinkröhrchen zeigt das Deformieren an.

*Variante d: Ausdehnung einer Metallkugel (Kugel-Ring-Versuch)*

Man setzt die kalte Kugel auf die Öffnung des Ständers; sie fällt hindurch. Erwärmt man sie mit einem Bunsenbrenner, so dehnt sie sich aus und sitzt auf der Öffnung auf. Sie fällt erst hindurch, wenn sie sich wieder abgekühlt hat (Abb. 2.1.1./4).

## 2.1.2. Volumenänderung von Nichtmetallen

*Zu Versuch 1*

1. Dicke Holzplatte als Grundbrett
2. zwei Glasröhren ( $\varnothing$  5 mm; Länge 500 mm)
3. Streichhölzer bzw. Bunsenbrenner
4. Vertikalmaßstab mit Schieberzeiger
5. Projektionseinrichtung

*Zu Versuch 2*

- Gerät 4., außerdem
6. Holzstab oder langer Bleistift
  7. Gummiband (Einkochgummi)

*Zu Versuch 3*

- Geräte 1. und 3., außerdem
8. 2 Plaststäbe (z.B. PVC, Vulkanfiber, Plastschweißdraht;  $\varnothing$  etwa 3 mm)

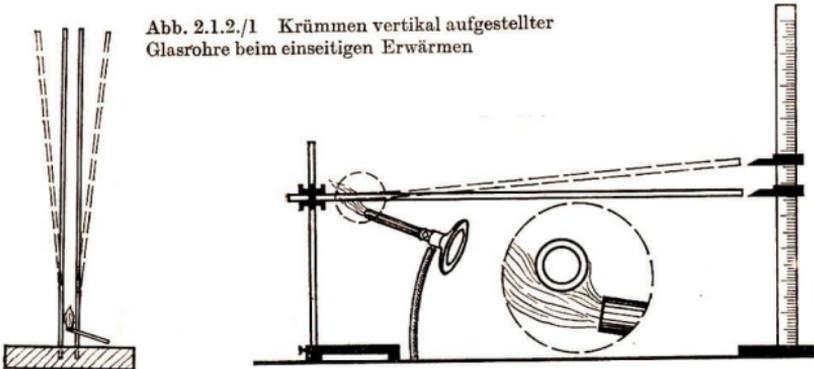


Abb. 2.1.2./1 Krümmen vertikal aufgestellter Glasrohre beim einseitigen Erwärmen

Abb. 2.1.2./2 Krümmen eines Glasrohres durch einseitiges Erwärmen. Nebenbild: Blick auf die Glasröhre vom Stativ zum freien Ende hin

### Versuch 1: Formveränderung von Glas

#### Variante a

Der Versuch wird nach Abbildung 2.1.2./1 aufgebaut. In einer dicken Grundplatte werden im Abstand von 5 mm zwei parallele Bohrungen angebracht, in die zwei Glasröhren eingeführt werden, die straff in den Bohrungen sitzen müssen. Sie können mit Hilfe dieser Vorrichtung vertikal auf den Tisch gestellt werden. Hält man zwischen die Röhren nahe ihrem unteren Ende ein brennendes Streichholz, so werden die Röhren auf der Innenseite erwärmt und krümmen sich nach außen. Ihre oberen Enden rücken weit auseinander.

#### Variante b

Ein etwa 500 mm langes Glasrohr wird mit einem Ende in einem Holzklötzchen oder mit Hilfe eines Glasröhrenhalters befestigt. Das freie Ende des Rohres befindet sich vor dem Vertikalmaßstab, wie es Abbildung 2.1.2./2 zeigt.

Dicht neben der Klemmstelle hält man einen Bunsenbrenner waagrecht so unter die Glasröhre, daß die Flamme die Unterseite der Röhre gerade streift. Infolge dieser einseitigen und begrenzten Erwärmung krümmt sich die Glasröhre. Das freie Ende hebt sich entgegen der Gewichtskraft.

Man darf die Röhre nicht zu lange erwärmen, da sich sonst die Erwärmung auch auf die obere Rohrwand ausbreitet und die Rohrkrümmung sich dadurch verringert.

#### Bemerkung

Die Ausdehnung bei einseitiger Erwärmung kann mitunter Anlaß zu Störungen oder zu Ausfällen in der Produktion sein. So können Glasgefäße, die eine größere Dicke haben, infolge der dabei auftretenden inneren Spannung zerspringen, wenn sie an einer Stelle zu stark erwärmt werden. Ein Wasser- oder ein Ölbad schützen davor weitgehend. Beim autogenen Schweißen dicker Eisenbleche entsteht längs der Schweißnaht eine konvexe Verwerfung. Man begegnet ihr dadurch, daß man die Nahtkanten abschrägt und die Bleche so lagert, daß die Nahtkante etwas erhöht liegt. Nach dem Erkalten der Nahtkanten sind die Bleche in einer Ebene ausgerichtet.

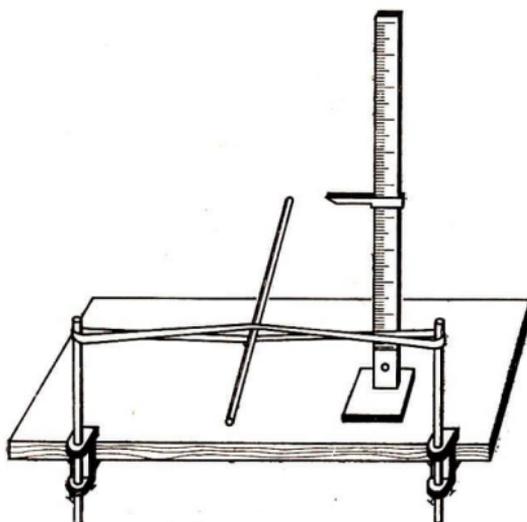


Abb. 2.1.2./3 Zusammenziehen eines Gummibandes durch Erwärmen

### Versuch 2: Formveränderung von Gummi

Der Versuchsaufbau ist der Abbildung 2.1.2./3 zu entnehmen. Ein Einkochglasgummi wird nicht allzu straff zwischen zwei Stativstäben gespannt.

Eine Meßeinrichtung — ein dünner, leichter Stab — wird zwischen die beiden Gummibahnen gesteckt, so daß der Stab den Gummi verdrillt. Mit Hilfe des Schieberzeigers am Vertikalmaßstab kann man die Ausgangsstellung festlegen.

Das Gummiband wird leicht mit der Flamme eines Bunsenbrenners oder eines Streichholzes bestrichen. Das erwärmte Gummistück zieht sich zusammen und verändert die Neigung des Stabes. Beim Abkühlen geht er wieder in die Ausgangsstellung zurück.

### Versuch 3: Formveränderung von Plasten

Der Versuchsaufbau erfolgt ebenfalls nach Abbildung 2.1.2./1, Variante a. In einer dicken Grundplatte werden im Abstand von 5 mm zwei parallele Bohrungen angebracht, in die zwei Plaststäbe straff eingesteckt werden.

Zwischen die Stäbe wird nahe ihrem unteren Ende *kurzzeitig* ein brennendes Streichholz gehalten. Die Stäbe werden an ihrer Innenseite erwärmt und krümmen sich nach außen. Beim Abkühlen gehen sie wieder in die Ausgangslage zurück.

#### Bemerkung

Plaste haben im allgemeinen einen sehr niedrigen Schmelzpunkt. Sie erweichen deshalb an der erwärmten Stelle innerhalb kurzer Zeit. Dann gehen sie nach dem Entfernen der Flamme nicht wieder in die Ausgangslage zurück.

### 2.1.3. Kraftwirkung bei der Volumenänderung eines Körpers

#### Zu Variante a

1. Dünner Draht (Länge etwa 1000 mm;  $\varnothing$  etwa 0,3 mm)
2. 2 Holtzsche Klemmen
3. Stromversorgungsgerät (20 V—)
4. Schiebewiderstand (bis etwa 4 A belastbar)

#### Zu Variante b

5. Kontraktionsapparat nach Tyndall
6. Bolzen (40 mm;  $\varnothing$  8 mm)
7. Bunsenbrenner

#### Zu Variante c

- Gerät 7., außerdem
8. 2 Stahldrähte (Länge etwa 600 mm;  $\varnothing$  etwa 2 mm) oder Fahrradspeichen
  9. Speiler oder Trinkröhrchen

#### Variante a: Zerreißen eines Drahtes beim Abkühlen

Der Versuchsaufbau erfolgt gemäß Abbildung 2.1.3./1. Ein dünner Draht wird befestigt und straff gespannt. Der Stromkreis wird geschlossen und der Draht zu dunkelrotem Glühen gebracht. Während des Glühens ist der Draht ständig nachzuspannen. Nach einiger Zeit wird der Stromkreis unterbrochen. Nun kühlt sich der Draht ab und zerreißt.

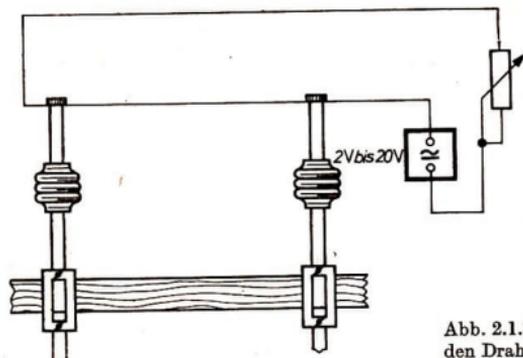


Abb. 2.1.3./1 Zerreißen eines sich abkühlenden Drahtes



#### Variante b: Sprengen eines Metallbolzens mit dem Tyndallschen Kontraktionsapparat

Das Gerät eignet sich zur Demonstration der Kräfte, die sowohl beim Ausdehnen als auch beim Zusammenziehen eines Metallstabes auftreten können. Beim Demonstrieren der Kraftwirkung infolge des *Erwärmens* sind die *inneren* Rändelmuttern bis zum Anschlag zurückzuziehen. Die *äußeren* Rändelmuttern werden nach dem Einsetzen des Bolzens in die innere Bohrung fest angedreht. Nach einer Erwärmungszeit von etwa einer Minute wird der Bolzen zerbrochen.

Beim Demonstrieren der Kraftwirkung infolge des *Abkühlens* werden die *äußeren* Rändelmuttern bis zum Anschlag zurückgedreht. Der Bolzen wird in die *äußere*

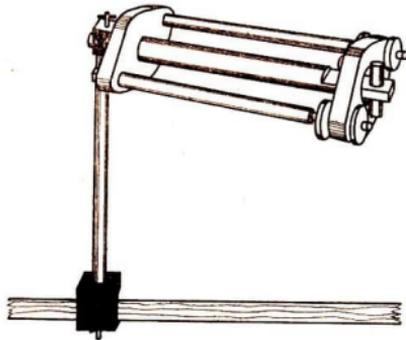


Abb. 2.1.3./2 Kraftwirkung beim Tyndall-  
schen Kontraktionsapparat

Bohrung eingesetzt. Die inneren Rändelmuttern sind nach dem Erwärmen anzu-  
ziehen. Dann entfernt man den Bunsenbrenner und läßt den Ausdehnungsstab  
durch mehrmaliges Auflegen eines feuchten Tuches rasch abkühlen. Nach kurzer  
Zeit bricht der Bolzen (Abb. 2.1.3./2).

*Variante c: Wirkungsprinzip eines Dehnungsausgleichers*

Der Versuch wird nach den Abbildungen 2.1.3./3 und 2.1.3./4 aufgebaut. Der eine  
Stahldraht wird nach Abbildung 2.1.3./3 zurechtgebogen. Dann wird der zweite  
Stahldraht auf die gleiche Länge geschnitten. Man kann an Stelle eines Drahtes  
auch zwei durch einen Nippel zusammengeschaubte Fahrradspeichen benutzen.  
Der Versuchsdraht wird zwischen zwei an Tischklemmen befestigten Stativstäben  
festgeklemmt, wobei seine Enden an den beiden zur Aufnahme dienenden Kreuz-  
muffen ein festes Widerlager finden (Abb. 2.1.3./4).

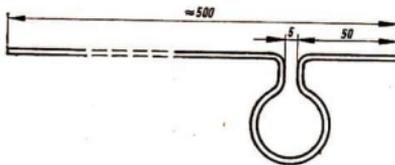


Abb. 2.1.3./3 Modell eines Dehnungs-  
ausgleichers

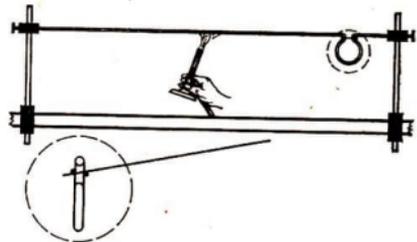


Abb. 2.1.3./4 Modellversuch zum Dehnungs-  
ausgleichers

Zunächst wird der Draht ohne Dehnungsausgleichers eingeklemmt. Bestreicht man  
ihn von unten mit einer Bunsenbrennerflamme, so biegt er sich nach kurzer Zeit  
infolge seiner Ausdehnung nach unten durch. Beim Abkühlen nimmt er seine ur-  
sprüngliche Form wieder an.

Der Draht mit dem Dehnungsausgleichers wird so eingeklemmt, daß der Krümmer  
nach unten gerichtet ist. Beim Erwärmen des Drahtes erfolgt keine Krümmung.

Die Aufnahme der Längenausdehnung durch den Krümmer ist dadurch festzustellen, daß man um die Stelle des Drahtes, an der sich die beiden nach unten gerichteten Teile des Dehnungsausgleichers sehr nahe gegenüberstehen, einen Bindfaden fest herumbindet. Zwischen den beiden parallellaufenden Fadenteilen steckt man einen Speiler hindurch. Der Fadenteil, auf dem der Speiler aufliegt, gibt bei einer Ausdehnung des Drahtes etwas nach, so daß sich das freie Ende des Speilers geringfügig senkt, während es sich bei der folgenden Abkühlung wieder hebt.

#### Bemerkungen

1. Soll die Variante c als Schülerexperiment durchgeführt werden, so kann man auch einen Meßschieber zum Ermitteln der Ausdehnung verwenden. Mit diesem wird gemessen, um welchen Betrag sich der Abstand zwischen den beiden senkrechten Schenkeln des Dehnungsausgleichers während des Versuches verringert.
2. Die Variante c kann unter Verwendung einer etwa 1000 mm langen Glasröhre noch praxisnäher gestaltet werden. Man biegt die Röhre über einer Flamme zu einer Öse, befestigt sie waagrecht zwischen zwei Halterungen und erhitzt sie, indem man Wasserdampf hindurchleitet. Der an der Öse angebrachte Zeiger beginnt sofort auszuschlagen.

## 2.1.4. Verformung eines Bimetallstreifens [SE]

#### Zu Versuch 1

1. Bimetallstreifen (Fe—Al)
2. Bunsenbrenner oder Stativheizplatte
3. Vertikalmaßstab mit Schiebezeiger

#### Zu Versuch 2

- Geräte 2. und 3., außerdem
4. genietete Metallstreifen aus gleichem Material (z. B. Fe—Fe)

#### Methodische Hinweise

1. Die Versuche eignen sich zum Demonstrieren der unterschiedlichen Ausdehnung verschiedener Metalle. Es ist zweckmäßig, erst das Verhalten des Bimetall-

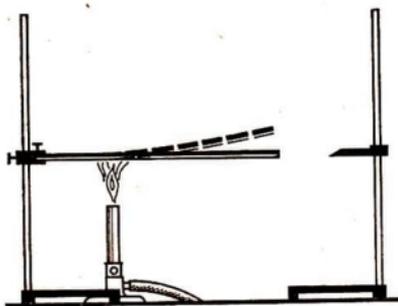


Abb. 2.1.4./1 Krümmung eines erwärmten Bimetallstreifens

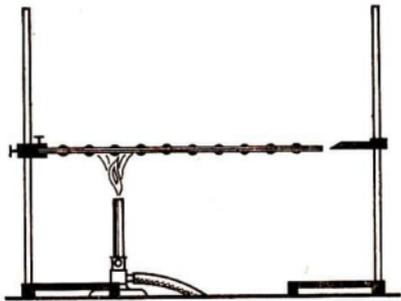


Abb. 2.1.4./2 Erwärmen von zwei vernieteten Metallstreifen aus gleichem Material

streifens und danach das der beiden vernieteten Streifen aus gleichem Material bei Temperaturänderungen zu zeigen.

- Bei Schülerexperimenten sollte an Stelle des Bunsenbrenners die Stativheizplatte eingesetzt werden.

*Versuch 1: Krümmung eines Bimetallstreifens bei Temperaturänderung*

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.1.4./1. Der Bimetallstreifen wird mit dem einen Ende — wenn möglich wärmedämmend — in einer Kreuzmuffe festgeklemmt und an einem Stativstab angebracht. Der Schiebezeiger befindet sich in der Ausgangsstellung. Erwärmt man den Bimetallstreifen, dann krümmt er sich. Sein freies Ende weicht dabei nach der Seite aus, an der sich der Eisenblechstreifen befindet.

*Versuch 2: Verhalten zweier vernieteter Eisenstreifen*

Der Bimetallstreifen wird durch die vernieteten Metallstreifen aus gleichem Material ersetzt (Abb. 2.1.4./2). Erwärmt man diesen Streifen, so erfolgt *keine* Krümmung.

**2.1.5. Elektrische Kontaktgabe durch einen Bimetallstreifen [SE]**

- |  |   |
|--|---|
| 1. Bimetallstreifen                              | 4. Glühlampe (6 V; 0,1 A)<br>oder elektrische Klingel |
| 2. Kontaktschraubenträger<br>mit Kontaktschraube | 5. Stromversorgungsgerät                              |
| 3. Klemmenstange                                 | 6. Bunsenbrenner (oder Kerze)                         |

*Methodischer Hinweis*

Dieser Versuch ist als Modellversuch zur Wirkungsweise eines automatischen Feuermelders oder einer elektrischen Signaleinrichtung anzusehen.

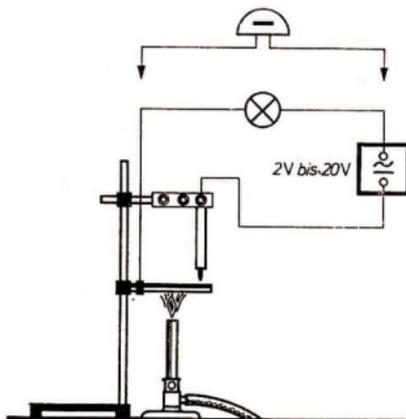


Abb. 2.1.5./1 Verwendung eines Bimetallstreifens bei einer elektrischen Signaleinrichtung (halbschematisch)

### Versuch

Ein Bimetallstreifen wird an einem Ende horizontal mit der sich stärker ausdehnenden Seite nach unten an ein Stativ geklemmt. An dem festen Ende wird eine Polklemme befestigt. Dicht über dem freien Ende wird an einer Klemmenstange ein Kontaktschraubenträger angebracht. Die Polklemme und den Kontaktschraubenträger verbindet man unter Zwischenschalten einer Kleinspannungsglühlampe oder einer elektrischen Klingel mit einer Kleinspannungsquelle (Abb. 2.1.5./1). Man erwärmt den Bimetallstreifen vorsichtig. Nach kurzer Zeit verbiegt er sich und schließt den Stromkreis. Die Lampe leuchtet auf bzw. die Klingel ertönt.

### Bemerkung

Der Bimetallstreifen ist ein wichtiges Bauelement für eine große Anzahl technischer Geräte, Temperaturmeßgeräte und Signaleinrichtungen.

## 2.1.6. Modellversuche zur Temperaturregelung

### Zu Variante a

1. Bimetallstreifen
2. Strommesser
3. Klemmenstange
4. Kontaktschraubenträger mit Kontaktschraube
5. Heizwendel mit Halter (SEG Kalorik)
6. 2 Glühlampen (12 V; 0,1 A)
7. Stromversorgungsgerät (12 V  $\approx$ )

### Zu Variante b

- Geräte 2. bis 7., außerdem
8. Bimetallschalter aus einem Bügeleisen oder Heizkissen

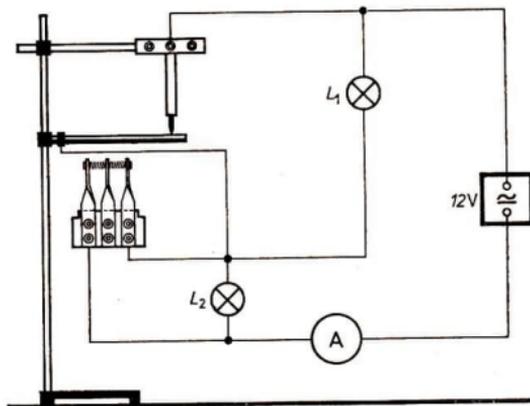


Abb. 2.1.6./1 Modell einer Temperaturregelung

### Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist ein Beispiel für die technische Nutzung der Volumenänderung fester Körper bei Temperaturänderung. Er eignet sich auch zur Demonstration der Temperaturregelung (vgl. auch Physikalische Schulversuche, 6. Teil, S. 62, Abb. 2.3.6./1).

### Variante a

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.1.6./1. Der Bimetallstreifen berührt in kaltem Zustand mit dem Zink- bzw. dem Aluminiumstreifen eine Kontaktschraube, die am unteren Ende des Kontaktschraubenträgers sitzt. Die Wärmequelle, der Bimetallstreifen und der Kontaktschraubenträger sind in Reihe geschaltet.

Parallel zur Wärmequelle liegt die Glühlampe  $L_2$ , parallel zum Bimetallstreifen und zum Kontaktschraubenträger die Glühlampe  $L_1$ .

Schließt man den Stromkreis, so fließt der Strom durch die Wärmequelle, den Bimetallstreifen und den Kontaktschraubenträger. Die Glühlampe  $L_2$  leuchtet auf.

Mit zunehmender Temperatur krümmt sich der Bimetallstreifen. Der Stromkreis wird zwischen dem Bimetallstreifen und der Kontaktschraube unterbrochen. Die Glühlampe  $L_2$  erlischt, die Glühlampe  $L_1$  leuchtet auf.

Der Bimetallstreifen kühlt sich ab und schließt den Kontakt erneut.

*Bemerkung*

Die Heizwendel sollte so angebracht werden, daß sie den Bimetallstreifen in der Nähe des Stativstabes erwärmt. Dadurch wird die Schaltfrequenz erhöht.

*Variante b*

Der Versuch unterscheidet sich von Variante a nur geringfügig. Ein aus einem alten Bügeleisen oder Heizkissen ausgebauter Bimetallschalter wird an Stelle des Bimetallstreifens benutzt. Die Heizwendel erwärmt den Bimetallschalter so lange, bis der Stromkreis unterbrochen wird.

**2.1.7. Experiment mit dem Gerät zur Demonstration der Ausdehnung der Körper**

1. Gerät zur Demonstration der Ausdehnung der Körper durch Wärme
2. Erlenmeyerkolben
3. Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtgewebe mit Asbest oder Stativheizplatte
4. Gummistopfen mit Glasrohr
5. Gummischlauch
6. Becherglas
7. Siedeperlen
8. Stelltisch

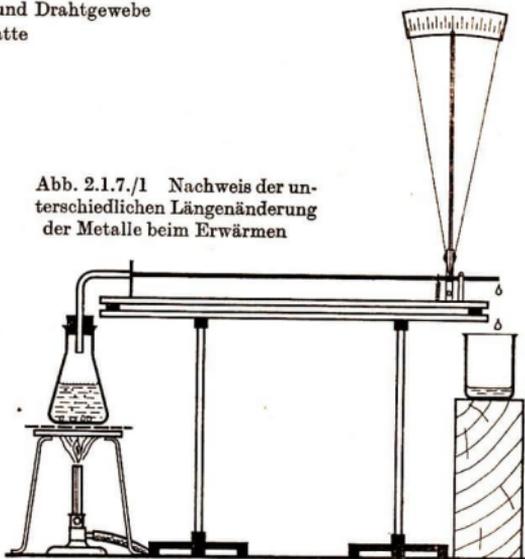
*Methodischer Hinweis*

Dieser Versuch eignet sich zum qualitativen Vergleich der Längenänderung verschiedener Metalle bei Temperaturänderung. Auch als Praktikumsversuch läßt er sich, unter Beachtung der erforderlichen Sicherheitsbestimmungen, verwenden.

*Versuch*

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.1.7./1. Das Wasser ist im Erlen-

Abb. 2.1.7./1 Nachweis der unterschiedlichen Längenänderung der Metalle beim Erwärmen



meyerkolben zum Sieden zu bringen. Der Dampf wird durch die Metallrohre geleitet. Das dabei entstehende Kondenswasser ist in einem Becherglas aufzufangen. Die Rohre erwärmen sich um etwa die gleiche Temperaturdifferenz. Ihre Längenänderungen sind jedoch ungleich. Das ist am unterschiedlichen Zeigerausschlag zu erkennen. Beim Abkühlen geht der Zeigerausschlag wieder zurück.

*Bemerkung*

Aus Sicherheitsgründen sind Siedeperlen ins Wasser zu bringen.

## 2.1.8. Messung der Längenänderung von Metallen und Glas

1. Gerät zur Bestimmung des linearen Ausdehnungskoeffizienten
2. Rolle mit Stiel
3. Verbindungsschlauch mit Winkelröhre und Stopfen
4. Schlauchstutzen
5. Erlenmeyerkolben
6. Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtgewebe mit Asbest
7. Thermometer (0 °C bis 100 °C)

*Versuch*

Wie aus Abbildung 2.1.8./1 ersichtlich, wird die Röhre auf der einen Seite in einer Stabmuffe festgeklemmt und auf der anderen Seite auf einer Rolle gelagert. Mit dem Seitensteg drückt die Röhre gegen den Taster der Meßuhr. Der lineare Aus-

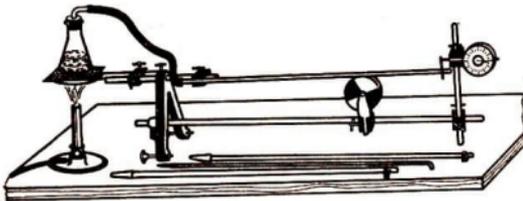


Abb. 2.1.8./1 Versuchsanordnung zur Bestimmung des linearen Ausdehnungskoeffizienten durch eine Meßuhr

dehnungskoeffizient ist mit diesem Versuch am einfachsten meßbar, da er keine Zeigerübertragung erfordert. Die Längenänderung wird unmittelbar an der Meßuhr abgelesen.

Der Versuch wird in folgenden Schritten ausgeführt:

1. Feststellen der Röhrenlänge  $l_1$  von der Klemmschraube der Stabmuffe bis zur Endfläche des Seitensteges, Ablesen der Zimmertemperatur  $\vartheta_1$  und der Meßuhreinstellung,
2. Aufsetzen des Stopfens am Verbindungsschlauch auf den inzwischen vorgewärmten Erlenmeyerkolben und
3. nach dem Aufhören des Kondenswasseraustritts aus dem Schlauchstutzen, Ermitteln der Verlängerung  $\Delta l$  durch erneutes Ablesen der Meßuhr.

Man kann mit ausreichender Genauigkeit die Temperatur des Dampfes mit  $\vartheta_2 = 100 \text{ °C}$  annehmen.

Wegen  $\Delta l = \alpha l_1 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)$  gilt:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_1 (\vartheta_2 - \vartheta_1)} = \frac{\Delta l}{l_1 \cdot \Delta \vartheta}$$

*Beispiel für die Berechnung des linearen Ausdehnungskoeffizienten von Messing*

Gegeben:

$$l_1 = 510 \text{ mm}$$

$$\vartheta_1 = 18,0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta l = 0,80 \text{ mm}$$

Lösung:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_1 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)}$$

$$\alpha = \frac{0,80 \text{ mm}}{510 \text{ mm} \cdot 82 \text{ K}}$$

$$\alpha = \underline{\underline{0,000019 \text{ K}^{-1}}}$$

Gesucht:

$\alpha$

Der lineare Ausdehnungskoeffizient von Messing beträgt  $0,000019 \text{ K}^{-1}$ .

*Bemerkungen*

1. Die Ausdehnungskoeffizienten von Aluminium, Stahl und Glas werden in analoger Weise gemessen.
2. Dieses Experiment ist vorwiegend als Praktikumsversuch geeignet.
3. Das austretende Kondenswasser ist in einem Becherglas aufzufangen.
4. Die zur Berechnung von  $\alpha$  verwendete Gleichung gilt nur näherungsweise.

## 2.2. Volumenänderung flüssiger Körper

### 2.2.1. Volumenänderung des Wassers oder anderer Flüssigkeiten beim Erwärmen [SE]

1. Rundkolben (250 ml)
2. Becherglas (1000 ml)
3. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
4. Glasröhre ( $\varnothing$  2 mm)
5. Millimeterpapier auf Karton
6. Rührer
7. Stativheizplatte
8. Wasser oder Brennspiritus oder Petroleum
9. Färbemittel für Wasser ( $\text{KMnO}_4$ ), für Brennspiritus (Fuchsin) oder für Petroleum (Drachensblut)

*Versuch*

Der Versuchsaufbau ist unabhängig von der Art der Flüssigkeit, mit der die Volumenänderung nachgewiesen werden soll, und erfolgt im Prinzip immer nach Abbildung 2.2.1./1.

Ein Rundkolben wird z. B. mit gefärbtem Wasser gefüllt und durch einen gut sitzenden Gummistopfen dicht verschlossen. Durch den Gummistopfen steckt man

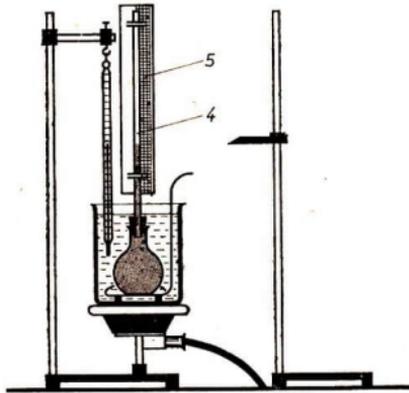


Abb. 2.2.1./1 Nachweis der Volumenänderung des Wassers beim Erwärmen

eine dünne Glasröhre als Steigrohr, in der das Wasser einige Zentimeter über dem Stopfen steht. Dieses Ausgangsvolumen wird durch einen Zeiger markiert, und auf das Steigrohr schiebt man einen Streifen Millimeterpapier als Skale. Der Kolben wird im Wasserbad mit der Stativheizplatte erwärmt. Die Volumenzunahme der gefärbten Flüssigkeit ist am veränderten Wasserstand in der Steigröhre erkennbar. Sie wird nach Temperaturänderungen von jeweils 5K abgelesen, in eine Tabelle eingetragen und kann in einem Volumenänderung-Temperaturänderungs-Diagramm dargestellt werden.

#### Bemerkungen

1. Soll der Versuch quantitative Ergebnisse liefern, so muß die Glasröhre kalibriert werden (vgl. V 2.2.5.). Neben  $\vartheta$  bzw.  $\Delta\vartheta$  und  $V$  kann dann  $\Delta V$  (in  $\text{cm}^3$ ) ermittelt werden.
2. Wird der Versuch als Demonstrationsversuch ausgeführt, dann ist die Verwendung eines Schauthermometers zu empfehlen.

## 2.2.2. Vergleich der Ausdehnung verschiedener Flüssigkeiten beim Erwärmen

1. 3 gleiche Reagenzgläser
2. 3 einfach durchbohrte Gummistopfen
3. 3 Glasröhren
4. Kartonstreifen
5. Glasküvette
6. Stativheizplatte
7. Wasser, Petroleum, Brennspritus
8. Färbemittel für Wasser ( $\text{KMnO}_4$ ), für Petroleum (Drachenblut) und für Brennspritus (Fuchsin)
9. Tageslichtschreibprojektor mit Folie (Koordinatenkreuz) und Kippanordnung für den Tageslichtschreibprojektor

*Versuch*

Die drei Reagenzgläser werden mit Wasser, Petroleum und Brennspritus (jeweils gefärbt) gefüllt und durch gut sitzende Gummistopfen verschlossen, in denen die Steigröhren mit gleichen Abmessungen stecken. Es ist darauf zu achten, daß unter den Gummistopfen keine Luftblasen eingeschlossen werden und daß die Flüssigkeiten vor Versuchsbeginn in allen Steigröhren gleich hoch stehen.

Der Kartonstreifen wird mit drei Löchern für die Halterung der Reagenzgläser versehen. Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.2.2./1.

Das Wasserbad wird gleichmäßig erwärmt. Die Volumenänderungen von Wasser, Petroleum und Brennspritus verhalten sich etwa wie 1:5:6.

Zur Verbesserung der Sichtverhältnisse für alle Schüler kann mit Hilfe des Tageslichtschreibprojektors und der dazugehörigen Kippanordnung eine Abbildung durchgeführt werden, wobei die Folie mit dem Koordinatenkreuz die Unterschiede in den Volumenänderungen deutlicher veranschaulichen soll.

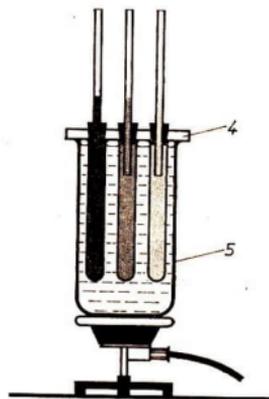


Abb. 2.2.2./1 Vergleich der Ausdehnung verschiedener Flüssigkeiten beim Erwärmen

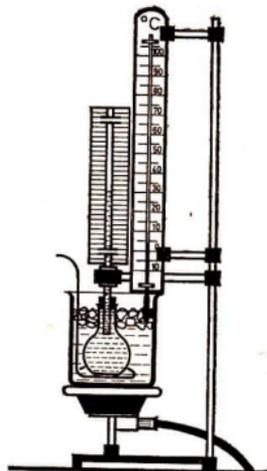
*Bemerkung*

Da die Siedetemperatur von Brennspritus etwa 80 °C beträgt, ist der Versuch bei etwa 60 °C abzubrechen.

**2.2.3. Volumenänderung des Wassers im Temperaturbereich von 0 °C bis 10 °C— Die Anomalie des Wassers**

1. Rundkolben (250 ml)
2. durchbohrter Gummistopfen zum Rundkolben
3. Glasröhre (Innendurchmesser 2 mm; Länge 40 mm)
4. Becherglas (2000 ml)
5. Heizplatte
6. Schauthermometer ohne Schutzkappe
7. Eistücke
8. Rührer

Abb. 2.2.3./1 Volumenänderung tiefgekühlten Wassers beim Erwärmen



*Methodische Hinweise*

1. Dieser Demonstrationsversuch ermöglicht es zu erklären, warum tiefere Gewässer auch bei strengstem Frost nicht vollständig vereisen (vgl. V 2.2.4.).  
Er macht auch deutlich, warum Wasser nicht als Thermometerflüssigkeit geeignet ist.
2. Der Versuch ist für quantitative Auswertung nicht geeignet, da die Volumenänderung des Rundkolbens und der anderen Geräte die Volumenänderung des Wassers überlagert.

*Versuch*

Zur Bereitung tiefgekühlten Wassers gießt man etwa 500 ml kaltes Wasser in das Becherglas und füllt mit Eisstückchen bis 5 cm unter dem Rand auf. Man mischt das Wasser mit dem Eis von Zeit zu Zeit mit Hilfe eines Rührers aus Draht. Nach etwa 5 Minuten füllt man einen kleinen Rundkolben mit dem tiefgekühlten Wasser und verschließt ihn durch einen Gummistopfen, in dem ein Glasrohr von etwa 2 mm Innendurchmesser steckt. Dabei dürfen keine Eisstücke in den Kolben kommen und keine Luftblasen unter dem Stopfen entstehen. Das Wasser soll im Steigrohr etwa 10 cm über dem Stopfen stehen.

Der Kolben wird in das Wasser mit den Eisstückchen getaucht und an einem Stativ befestigt (Abb. 2.2.3./1). Man erwärmt das Wasserbad mit der Heizplatte und rührt gut um, so daß es sich überall gleichmäßig erwärmt. Dabei kann man aus der Veränderung des Wasserspiegels im Steigrohr schließen, daß das Volumen des Wassers im Kolben beim Erwärmen zunächst abnimmt und sich danach wieder vergrößert.

*Bemerkung*

Das tiefgekühlte Wasser sollte vor dem Versuchsbeginn gefärbt werden, damit ein guter Kontrast erreicht wird.

## 2.2.4. Temperaturschichtung des Wassers bei Temperaturen zwischen 0 °C und 4 °C

1. Standzylinder
2. Eisstückchen
3. 3 Laborthermometer  $\left(0\text{ }^{\circ}\text{C bis }100\text{ }^{\circ}\text{C; Teilung } \frac{1}{10}\text{ K}\right)$
4. Rührer

*Methodischer Hinweis*

Vergleiche MH Nr. 1. V 2.2.3.!

*Versuch*

Ein hoher Standzylinder wird mit Wasser gefüllt. Eisstückchen werden dazugegeben, bis die Schichtdicke etwa 5 cm beträgt. Dann wird mehrfach gut umgerührt. Falls es erforderlich ist, werden Eisstückchen nachgeschüttet, damit die Dicke der Eisschicht längere Zeit nahezu konstant bleibt. Das Wasser-Eis-Gemisch läßt man

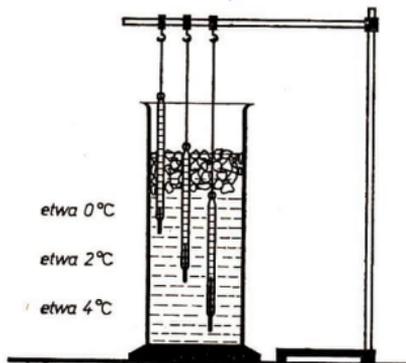


Abb. 2.2.4./1 Versuchsaufbau zur Beobachtung der Temperaturschichtung in tiefgekühltem Wasser

dann einige Minuten lang ruhig stehen. Die drei Laborthermometer werden vor dem Versuchsbeginn mit Fäden am Stativmaterial befestigt und können nun gleichzeitig in das Eiswasser getaucht werden (Abb. 2.2.4./1). Man beobachtet nach einiger Zeit im oberen Teil des Wassers zwischen den Eisstückchen eine Temperatur von etwa  $0^{\circ}\text{C}$ , in der Mitte des Zylinders eine Temperatur von etwa  $2^{\circ}\text{C}$  und unmittelbar über dem Boden des Zylinders eine Temperatur von etwa  $4^{\circ}\text{C}$ . Die Schüler erkennen, daß sich ein Temperaturgefälle vom Boden des Gefäßes bis zur Oberfläche ausgebildet hat.

#### *Bemerkung*

Wegen der verhältnismäßig langen Versuchsdauer sollte der Versuch am Anfang der Unterrichtsstunde beginnen, damit noch vor dem Ende der Stunde ein überzeugendes Ergebnis zur Verfügung steht.

### 2.2.5. Bestimmung des kubischen Ausdehnungskoeffizienten von Flüssigkeiten mit Hilfe eines Meßkolbens [SE]

1. Meßkolben (100 ml, mit langem, glattem Hals und einer Marke)
2. Meßzylinder (100 ml)
3. Becherglas (250ml; hohe Form)
4. Maßstab
5. Laborthermometer
6. Stativheizplatte
7. Rührer
8. Untersuchungsflüssigkeit (z. B. Petroleum, Benzol)

#### *Methodische Hinweise*

1. Der Versuch ist als Demonstrationsversuch geeignet, läßt sich aber wirkungsvoller als Schülerexperiment in getrennt-gemeinschaftlicher Arbeitsweise durchführen.
2. Es ist zu empfehlen, das Kalibrieren des Meßkolbenhalses durch Schüler vor Versuchsbeginn ausführen zu lassen. Der Flaschenhals eines Meßkolbens wird

kalibriert, indem man Wasser von 20 °C bis zur Marke einfüllt. Das Volumen beträgt 100 ml. Nun werden aus einem kleinen Meßzylinder 20 ml Wasser von 20 °C hinzugegeben. An einem Maßstab liest man die Wasserstandszunahme ab (Abb. 2.2.5./1). Sie beträgt beispielsweise 9,6 cm für 20 ml. Einem Zentimeter entspricht in diesem Falle eine Volumenzunahme von 2,1 ml.

### Versuch

Der bis zur Marke mit der zu untersuchenden Flüssigkeit, zum Beispiel Benzol, gefüllte Meßkolben wird in ein Wasserbad von genau 20 °C gebracht, so daß der Hals

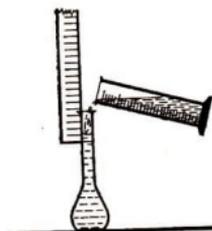


Abb. 2.2.5./1  
Kalibrieren eines  
Meßkolbenhalses

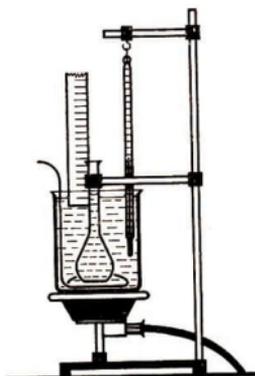


Abb. 2.2.5./2  
Bestimmung des  
kubischen Ausdehnungskoeffizienten  
einer Flüssigkeit

mindestens zur Hälfte von Wasser umgeben ist. Man erwärmt das Wasser mit einer Stativheizplatte um 20 K bis 25 K, rührt gut um und liest die Zunahme des Flüssigkeitsstandes am Maßstab ab (Abb. 2.2.5./2).

*Beispiele für Meßwerte zur Bestimmung des kubischen Ausdehnungskoeffizienten mit Hilfe eines Meßkolbens*

Unter- suchungs- flüssigkeit	$T_1$ in K	$T_2$ in K	$\Delta T$ in K	$V_1$ in ml	$V_2$ in ml	$\Delta V$ in ml	$\gamma = \frac{\Delta V}{V_1 \cdot \Delta T}$ in K <sup>-1</sup>
Benzol	293	313	20	100	102,1	2,1	0,0010
Petroleum	293	313	20	100	101,8	1,8	0,0009

### Bemerkung

Die Genauigkeit der Messung wird durch die Ausdehnung des Glases des Kolbens stark beeinträchtigt, da nur der Wert gemessen werden kann, um den sich die Flüssigkeit stärker als der Glasbehälter ausdehnt.

## 2.3. Volumen- und Druckänderung gasförmiger Körper

### 2.3.1. Volumenänderung von Luft beim Erwärmen

*Zu Variante a*

1. Erlenmeyerkolben (500 ml)
2. Stativheizplatte
3. Färbemittel für Wasser ( $\text{KMnO}_4$ , Lebensmittelfarbe)
4. Glasröhren, nach Bedarf gewinkelt
5. Becherglas

*Zu Variante b*

Geräte 1. bis 4.

*Zu Variante c*

Geräte 1. bis 4., außerdem

6. gerades Steigrohr oder gerades Kugelrohr

*Zu Variante d*

Geräte 1. bis 3., außerdem

7. Skale des  $p$ - $V$ - $T$ -Gerätes

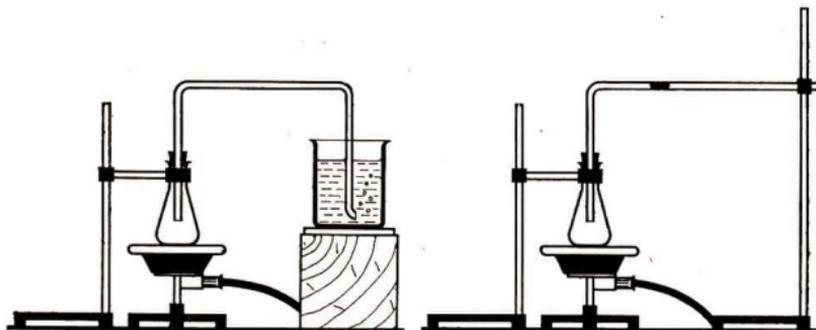


Abb. 2.3.1./1 Zu Variante a

Abb. 2.3.1./2 Zu Variante b

*Variante a*

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.3.1./1. Der Erlenmeyerkolben wird durch einen Gummistopfen verschlossen, durch den ein zweifach gewinkeltes Glasrohr gesteckt ist. Das Glasrohrende taucht man in das mit gefärbtem Wasser gefüllte Becherglas.

Mit der Heizplatte wird die Luft im Erlenmeyerkolben erhitzt, sie dehnt sich aus, entweicht teilweise durch das Glasrohr und steigt in Blasen im Wasser auf.

*Variante b*

Mit Hilfe einer Pipette läßt man etwas gefärbtes Wasser in die gewinkelte Glasröhre laufen und kann nun mit einem abgeschlossenen Gas experimentieren (Abb. 2.3.1./2).

Die Schüler können die Volumenänderung beim Erwärmen deutlich beobachten.

*Variante c*

Ein Erlenmeyerkolben wird etwa 1 cm hoch mit gefärbtem Wasser gefüllt und durch einen Gummistopfen verschlossen, durch den ein gerades Steigrohr nahezu bis an den Boden des Gefäßes geschoben wird.

Erwärmt man die Luft im Kolben, so dehnt sie sich aus und drückt das Wasser im Steigrohr in die Höhe (Abb. 2.3.1./3a).

An Stelle des geraden Steigrohres kann auch ein gerades Kugelrohr genommen werden (Abb. 2.3.1./3b).

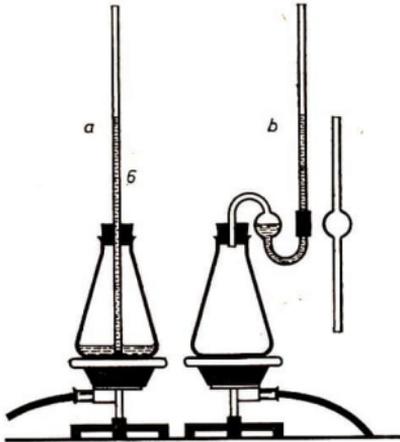


Abb. 2.3.1./3 Zu Variante c

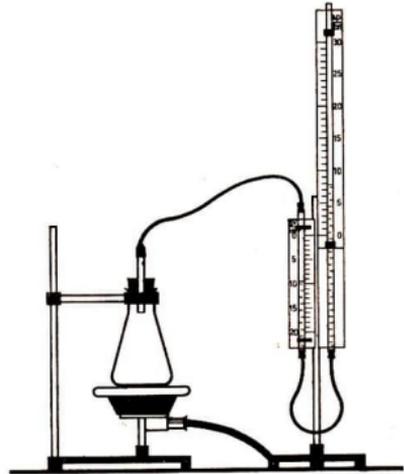


Abb. 2.3.1./4 Zu Variante d

*Variante d*

Der Versuch wird entsprechend der Abbildung 2.3.1./4 aufgebaut. Die Meßflüssigkeit soll am Versuchsbeginn bis zu den Nullmarken der  $\Delta V$ - und der  $\Delta p$ -Skale reichen.

Die eingeschlossene Luft wird erwärmt. Dadurch wird die Meßflüssigkeit verschoben, und bei einer Temperaturänderung von wenigen K (z. B. 4 K) können die Volumen- und die Druckänderung unmittelbar beobachtet werden.

*Bemerkungen*

1. Bei allen Varianten ist es möglich, zuerst mit der Hand zu erwärmen, dann mit der Heizplatte zu arbeiten und zum Schluß die Flamme eines Bunsenbrenners einzusetzen.
2. Die Versuchsvariante d ist als Vorversuch für spätere Untersuchungen mit dem  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät (vgl. 2.3.4.) geeignet. Man könnte bereits an dieser Stelle den Schülern demonstrieren, wie mit dem Manometer des  $p$ - $V$ - $T$ -Gerätes gearbeitet wird, wenn man für Zustandsänderungen des Gases im Erlenmeyerkolben  $\Delta V$  bzw.  $\Delta p$  für konstanten Druck bzw. konstantes Volumen an den Skalen ablesen will (vgl. V 2.3.4., Versuche 2 und 3).

### 2.3.2. Qualitativer Nachweis des Zusammenhangs zwischen Druck, Volumen und Temperatur eines Gases mit Hilfe eines Luftballons

1. 2 Infrarot-Hochtemperaturstrahler
2. Luftballon
3. grobmaschiges Netz aus schwer dehnbarem Material

#### Methodischer Hinweis

Dieser für die Schüler interessante Einführungsversuch gestattet es dem Lehrer, den Zusammenhang zwischen dem Druck  $p$ , der Temperatur  $T$  und dem Volumen  $V$  eines abgeschlossenen Gases anschaulich zu demonstrieren.

#### Versuch

Der Luftballon wird in das Netz gesteckt und so weit aufgeblasen, daß er es gerade ausfüllt.

Anschließend wird das Netz so an einem Stativ befestigt, daß es sich zwischen zwei gegeneinander strahlenden Infrarot-Hochtemperaturstrahlern befindet. Nach einigen Minuten bläht sich der Ballon sichtbar auf, so daß es zu Einschnürungen durch die Fäden des Netzes kommt.

### 2.3.3. Nachweis des Zusammenhangs zwischen Druck, Volumen und Temperatur eines Gases mit Hilfe eines Manometers

1. Skale des  $p$ - $V$ - $T$ -Gerätes
2. Schauthermometer
3. Becherglas (600 ml; niedrige Form)
4. Erlenmeyerkolben (300 ml; weithalsig)
5. Stativheizplatte
6. Schlauchverbindungen
7. Gummistopfen mit Glasröhre

#### Versuch

Der Erlenmeyerkolben wird mit einem durchbohrten Gummistopfen, durch den eine Glasröhre gesteckt ist, verschlossen, am Glasröhrenhalter befestigt und in das mit Wasser gefüllte Becherglas getaucht. Die Manometerrohre der  $\Delta p$ - und der  $\Delta V$ -Skale werden durch einen Schlauch miteinander verbunden. Die gefärbte Flüssigkeit (Wasser mit  $\text{KMnO}_4$  und etwas Fit) wird in den Manometerschenkel der  $\Delta V$ -Skale geschüttet, bis die Flüssigkeitssäule die auf gleicher Höhe stehenden Nullmarken der Skalen erreicht hat. Es ist

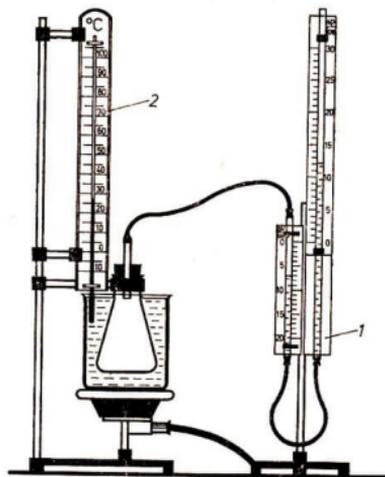


Abb. 2.3.3./1 Versuchsaufbau

zweckmäßig, das Glasrohr der  $\Delta V$ -Skale so weit nach oben zu verschieben, daß es etwa 5 cm über den Skalenrand hinausragt. Dadurch ist es leichter möglich, eine Gummischlauchverbindung zwischen Manometer und Erlenmeyerkolben herzustellen. Eine Feineinstellung der Nullmarke kann durch leichtes Verschieben der Manometerschenkel erfolgen (Abb. 2.3.3./1).

Das Wasserbad wird erwärmt. Die Schüler beobachten eine Änderung der physikalischen Größen Druck, Volumen und Temperatur und können damit einen Zusammenhang zwischen diesen Zustandsgrößen vermuten.

### 2.3.4. Experimente zur Herleitung bzw. Bestätigung der Zustandsgleichung des idealen Gases und ihrer Sonderfälle mit dem $p$ - $V$ - $T$ -Gerät

- |   |  |
|---|--|
| 1. $p$ - $V$ - $T$ -Gerät                       | 4. Spannungsmittel (Fit, Otrac o. ä.)                  |
| 2. Stromversorgungsgerät (12 V $\approx$ ; 4 A) | 5. Färbemittel (KMnO <sub>4</sub> , Lebensmittelfarbe) |
| 3. Barometer                                    |  |

#### Methodische Hinweise

- Das  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät ist schnell aufzubauen und gestattet die Herleitung bzw. Bestätigung
  - der Zustandsgleichung für das ideale Gas,
  - der Gleichung für isobare Zustandsänderungen ( $p = \text{konstant}$ ),
  - der Gleichung für isochore Zustandsänderungen ( $V = \text{konstant}$ ),
  - der Gleichung für isotherme Zustandsänderungen ( $T = \text{konstant}$ ) im Demonstrationsexperiment.
- Da die Werte für den Druck und das Volumen relativ groß im Vergleich zu ihren Änderungen sind, wirken sich bei der Bildung der Quotienten  $\frac{p}{T}$  und  $\frac{V}{T}$  Ablesefehler für die Druck-, Volumen- und Temperaturänderungen kaum aus.
- Obwohl die Temperatur auf Bruchteile von Kelvin genau abgelesen wird, ist es für die Bildung der Quotienten  $\frac{p}{T}$  bzw.  $\frac{V}{T}$  sinnvoll, die Temperaturen auf ganze Zahlenwerte zu runden. Entsprechendes gilt für das Volumen und den Druck.
- Sollen der Ausdehnungskoeffizient  $\gamma$  und der Spannungskoeffizient  $\beta$  des (idealen) Gases bestimmt werden (vgl. Variante), dann empfiehlt es sich, die Temperaturen mit einem Laborthermometer zu messen, da die Temperaturdifferenz maximal 2,5 K betragen kann (für größere Temperaturänderungen sind  $\Delta V$  und  $\Delta p$  bei isobarer bzw. isochorer Zustandsänderung nicht mehr ablesbar) und sich der Fehler für die Temperaturdifferenz in diesen Fällen sehr stark auswirkt.

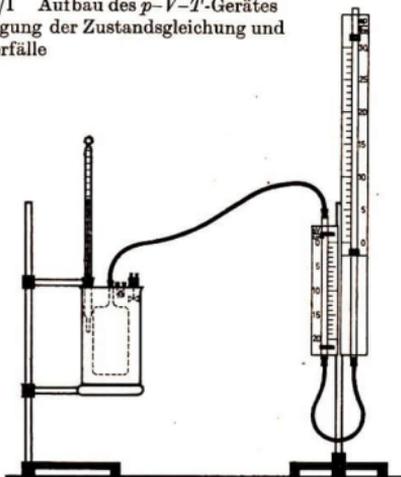
#### Versuchsaufbau

Der Versuch wird entsprechend der Abbildung 2.3.4./1 aufgebaut. Dabei ist folgendes zu beachten:

- Da die Deckplatte nicht als Halterung benutzt werden darf, ist es notwendig, den Behälter des  $p$ - $V$ - $T$ -Gerätes auf Stativmaterial (Kochring mit Stiel) zu setzen. Zur Erhöhung der Standfestigkeit wird am Gewindeblock auf der Deckplatte ein kurzer Stativstab eingeschraubt und mit einer Kreuzmuffe befestigt.

Abb. 2.3.4./1 Aufbau des  $p$ - $V$ - $T$ -Gerätes zur Bestätigung der Zustandsgleichung und ihrer Sonderfälle

- Das kalte Wasser (etwa 1000 cm<sup>3</sup>) wird durch die Thermometeröffnung der Deckplatte eingefüllt. Der Gasbehälter muß vollständig unter Wasser sein.
- Zur Füllung des Manometers werden etwa 60 ml Wasser gefärbt, ein Entspannungsmittel dazugegeben und die Meßflüssigkeit bei gelockelter Entlüftungsschraube in das Druckrohr gegossen, bis die Nullmarke der Volumenskale erreicht ist. Die Feineinstellung erfolgt durch vertikales Verschieben des Druckrohres. Vor Beginn der Messung muß die Entlüftungsschraube angezogen werden (abgeschlossene Gasmenge).



- Bei der Arbeit mit dem  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät darf keine Flüssigkeit in den Gasbehälter gelangen, da sonst die Meßergebnisse sehr ungenau werden.
- Beim Anschließen des Rührwerkes ist auf die richtige Polung zu achten.

*Versuch 1: Bestätigung der Zustandsgleichung für das Gasgemisch Luft*

Zur Bestätigung der Zustandsgleichung wird die Temperatur der abgeschlossenen Gasmenge durch Erwärmen des Wassers schrittweise um jeweils etwa 1 K erhöht. Die zusammengehörigen Werte von  $T$ ,  $V$  und  $p$  werden ermittelt, wobei die Volumenänderung unmittelbar an der  $\Delta V$ -Skale abgelesen werden kann. Zur Messung der Druckänderung wird die  $\Delta p$ -Skale relativ zum Manometerrohr (dessen Lage unverändert bleiben muß) so lange verschoben, bis deren Nullmarke in Höhe des linken Flüssigkeitsspiegels steht. Nun kann  $\Delta p$  abgelesen werden.

*Beispiele für die Meßwerte bei der Bestätigung der Zustandsgleichung für das Gasgemisch Luft*

$\vartheta$ in °C	$T$ in K	$\Delta p$ in Torr	$p$ in Torr	$\Delta V$ in cm <sup>3</sup>	$V$ in cm <sup>3</sup>	$\frac{p \cdot V}{T}$ in $\frac{\text{Torr} \cdot \text{cm}^3}{\text{K}}$
25,5	299	—	750	—	1000	$2,51 \cdot 10^3$
26,6	300	2,8	753	1,5	1002	$2,52 \cdot 10^3$
27,4	301	4,8	755	3,0	1003	$2,52 \cdot 10^3$
28,5	302	7,2	757	4,2	1004	$2,52 \cdot 10^3$

Unter Benutzung in kPa geeichter Meßgeräte ergeben sich folgende Werte:

$\vartheta$ in °C	$T$ in K	$\Delta p$ in kPa	$p$ in kPa	$\Delta V$ in cm <sup>3</sup>	$V$ in cm <sup>3</sup>	$\frac{p \cdot V}{T}$ in $\frac{\text{kPa} \cdot \text{cm}^3}{\text{K}}$
25,5	299	—	100,1	—	1000	335
26,6	300	0,37	100,5	1,5	1002	336
27,4	301	0,64	100,7	3,0	1003	336
28,5	302	0,96	101,1	4,2	1004	336

*Versuch 2: Bestätigung der Gleichung für isochore Zustandsänderungen*

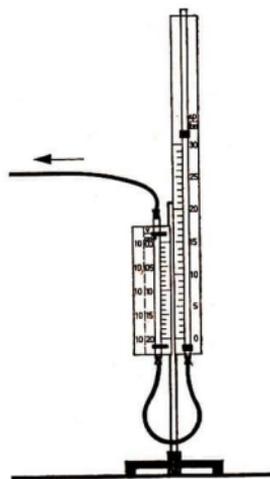
Die Manometerflüssigkeit wird auf die Nullmarken der  $\Delta p$ - und der  $\Delta V$ -Skale eingestellt. Der jeweils herrschende Luftdruck wird am Barometer abgelesen. Die Temperatur wird schrittweise erhöht. Durch Anheben des rechten Manometerrohres wird das Volumen des Gases immer wieder auf seinen Ausgangswert gebracht, sobald die Temperatur nicht mehr ansteigt. Auf der  $\Delta p$ -Skale, die beim Anheben des Manometerrohres nicht mit verschoben wird, kann die Druckänderung bei konstantem Volumen abgelesen werden.

*Beispiele für Meßwerte bei der Bestätigung der Gleichung für isochore Zustandsänderungen des Gasgemisches Luft ( $V_1 = 1000 \text{ cm}^3$ )*

$\vartheta$ in °C	$T$ in K	$\Delta p$ in Torr	$p$ in Torr	$\frac{p}{T}$ in $\frac{\text{Torr}}{\text{K}}$
20,7	294	—	750	2,55
21,7	295	2,9	753	2,55
22,4	296	5,4	755	2,55
23,5	297	8,4	758	2,55



Abb. 2.3.4./2 Skale des  $p$ - $V$ - $T$ -Gerätes zur Bestätigung des Boyle'schen Gesetzes



gert. Dieses Volumen ist bei der vorgeschlagenen Änderung der Skale direkt am linken Manometerrohr abzulesen. Zur Bestimmung der Druckdifferenz  $\Delta p$  wird die  $\Delta p$ -Skale relativ zum Manometerrohr so lange verschoben, bis die Nullmarke in Höhe des linken Flüssigkeitsspiegels steht.

*Beispiele für die Meßwerte bei der Bestätigung der Gleichung für isotherme Zustandsänderungen des Gasgemisches Luft*

$\Delta p$	$p$	$\Delta V$	$V$	$p \cdot V$
in Torr	in Torr	in $\text{cm}^3$	in $\text{cm}^3$	in Torr $\cdot \text{cm}^3$
—	750	—	1020	$765 \cdot 10^3$
4,5	755	5	1015	$766 \cdot 10^3$
7,8	758	10	1010	$766 \cdot 10^3$
12,0	762	15	1005	$766 \cdot 10^3$

Bei Benutzung in kPa geeichter Meßgeräte für den Druck ergeben sich die Werte:

$\Delta p$	$p$	$\Delta V$	$V$	$p \cdot V$
in kPa	in kPa	in $\text{cm}^3$	in $\text{cm}^3$	in kPa $\cdot \text{cm}^3$
—	100,1	—	1020	$102 \cdot 10^3$
0,60	100,7	5	1015	$102 \cdot 10^3$
1,04	101,1	10	1010	$102 \cdot 10^3$
1,60	101,7	15	1005	$102 \cdot 10^3$

Variante zu den Versuchen 2 und 3

Die Meßwerte zur Bestätigung der Gleichung für isobare bzw. isochore Zustandsänderungen lassen sich auch in einem einzigen Experiment für jede Temperaturdifferenz bestimmen. Die Temperatur wird schrittweise erhöht. Sobald sich die Temperatur nicht mehr ändert, wird nach Verschieben der  $\Delta p$ -Skale bzw. des rechten Manometerrohres für  $V = \text{konstant}$  die Druckänderung und für  $p = \text{konstant}$  die Volumenänderung gemessen.

Beispiele für die Meßwerte bei der Bestätigung der Gleichung für isochore und isobare Zustandsänderungen des Gasgemisches Luft

$\vartheta$ in °C	$\Delta T$ in K	$T$ in K	$\Delta V$ in cm <sup>3</sup>	$V$ in cm <sup>3</sup>	$\frac{V}{T}$ in $\frac{\text{cm}^3}{\text{K}}$	$\Delta p$ in Torr	$p$ in Torr	$\frac{p}{T}$ in $\frac{\text{Torr}}{\text{K}}$
20,7	—	294	—	1000	3,40	—	750	2,55
21,7	1,0	295	3,8	1004	3,40	2,9	753	2,55
22,4	1,7	296	6,5	1006	3,40	5,4	755	2,55
23,5	2,8	297	10,2	1010	3,40	8,4	758	2,55

Mißt man die Drücke mit Meßgeräten, die in kPa geeicht sind, ergeben sich folgende Werte:

$\vartheta$ in °C	$\Delta T$ in K	$T$ in K	$\Delta V$ in cm <sup>3</sup>	$V$ in cm <sup>3</sup>	$\frac{V}{T}$ in $\frac{\text{cm}^3}{\text{K}}$	$\Delta p$ in kPa	$p$ in kPa	$\frac{p}{T}$ in $\frac{\text{kPa}}{\text{K}}$
20,7	—	294	—	1000	3,40	—	100,1	0,340
21,7	1,0	295	3,8	1004	3,41	0,39	100,5	0,341
22,4	1,7	296	6,5	1006	3,40	0,72	100,8	0,340
23,5	2,8	297	10,2	1010	3,40	1,12	101,2	0,341

Berechnungen zum Ausdehnungs- und Spannungskoeffizienten

Mit den ermittelten Meßwerten aus den Versuchen 2 und 3 (oder der Variante) lassen sich der Ausdehnungskoeffizient  $\gamma$  und der Spannungskoeffizient  $\beta$  des Gasgemisches Luft bestimmen.

Berechnung des Ausdehnungskoeffizienten ( $p = \text{konstant}$ )

Gegeben:

$$V_1 = 1000 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V = 10,2 \text{ cm}^3$$

$$\Delta T = 2,8 \text{ K}$$

$$T_1 = 294 \text{ K}$$

$$T_0 = 273 \text{ K}$$

Gesucht:

$\gamma$

Lösung:

$$\gamma = \frac{T_1 \cdot \Delta V}{V_1 \cdot T_0 \cdot \Delta T}$$

$$\gamma = \frac{294 \text{ K} \cdot 10,2 \text{ cm}^3}{1000 \text{ cm}^3 \cdot 273 \text{ K} \cdot 2,8 \text{ K}}$$

$$\gamma \approx \underline{\underline{0,004 \text{ K}^{-1}}}$$

Berechnungen zum Spannungskoeffizienten ( $V = \text{konstant}$ )

Gegeben:

$$p_1 = 750 \text{ Torr}$$

$$T_1 = 294 \text{ K}$$

$$T_0 = 273 \text{ K}$$

$$\Delta p = 8,4 \text{ Torr}$$

$$\Delta T = 2,8 \text{ K}$$

Gesucht:

$\beta$

Lösung:

$$\beta = \frac{T_1 \cdot \Delta p}{p_1 \cdot T_0 \cdot \Delta T}$$

$$\beta = \frac{294 \text{ K} \cdot 8,4 \text{ Torr}}{750 \text{ Torr} \cdot 273 \text{ K} \cdot 2,8 \text{ K}}$$

$$\beta \approx \underline{\underline{0,004 \text{ K}^{-1}}}$$

Für das ideale Gas beträgt der Tabellenwert  $0,00366 \text{ K}^{-1}$ .

Bemerkungen

1. Aus  $V_1 = V_0(1 + \gamma \cdot \vartheta_1)$  und  $V_2 = V_0(1 + \gamma \cdot \vartheta_2)$  sowie  $\frac{V_0}{T_0} = \frac{V_1}{T_1}$  folgt:

$$\gamma = \frac{T_1 \cdot (V_2 - V_1)}{V_1 \cdot T_0 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)}$$

Setzt man  $V_2 - V_1 = \Delta V$  und  $\vartheta_2 - \vartheta_1 = T_2 - T_1 = \Delta T$ , dann ergibt sich

$$\gamma = \frac{T_1 \cdot \Delta V}{V_1 \cdot T_0 \cdot \Delta T}$$

2. Die Herleitung der Beziehung für  $\beta$  erfolgt analog zu der für  $\gamma$ .

### 2.3.5. Modellexperimente zur Zustandsgleichung und zu ihren Sonderfällen mit dem Gerät zur kinetischen Gastheorie

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| 1. Grundgerät                         | 5. Federkraftmesser                    |
| 2. Experimentiermotor                 | (1 N oder 100 p; als Druckkraftmesser) |
| 3. 200 bis 400 Stahl- oder Glaskugeln | 6. Zeiger                              |
| 4. leichter Stempel                   |  |

*Methodischer Hinweis*

Mit diesem Gerät können die mikrophysikalischen Vorgänge modellmäßig veranschaulicht werden.

*Versuch 1: Abhängigkeit des Volumens von der Temperatur bei konstantem Druck*

Der Versuchsaufbau erfolgt entsprechend der Abbildung 2.3.5./1. Es ist zu empfehlen, den Schülern vor Beginn des Experiments zu erläutern, daß eine Erhöhung der Drehzahl des Motors einer Erhöhung der Temperatur des Modellgases entspricht. Die Drehzahl des Motors wird so lange gleichmäßig erhöht, bis eine ausreichende Volumenänderung zu beobachten ist. Der leichte Stempel wird dabei gehoben und schwankt schließlich um eine Mittellage. Diese Schwankungen lassen sich mit Hilfe der unregelmäßigen Stöße der Kugeln gegen den leichten Stempel erklären.

*Versuch 2: Abhängigkeit des Drucks von der Temperatur bei konstantem Volumen*

Die Stahl- oder Glaskugeln werden in das Grundgerät gegeben und ein Ausgangsvolumen bei geringer Drehzahl des Motors markiert. Der Druckkraftmesser wird so eingestellt, daß keine Kraftwirkung angezeigt wird. Die Drehzahl des Motors wird erhöht, damit vergrößert sich das Volumen, und eine Druckkraftänderung ist abzulesen.

Soll das markierte Ausgangsvolumen wieder erreicht und damit das Volumen konstant gehalten werden, so muß diese Bedingung durch Herunterdrücken des Stempels mit Hilfe des Druckkraftmessers hergestellt werden. Die Schüler beobachten die Druckkraftänderung (Abb. 2.3.5./2).

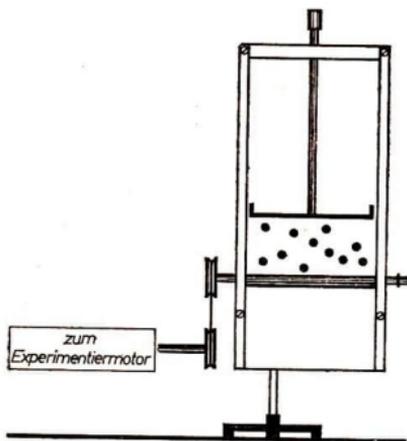


Abb. 2.3.5./1 Aufbau des Gerätes zur kinetischen Gastheorie bei isobaren Zustandsänderungen (oben)

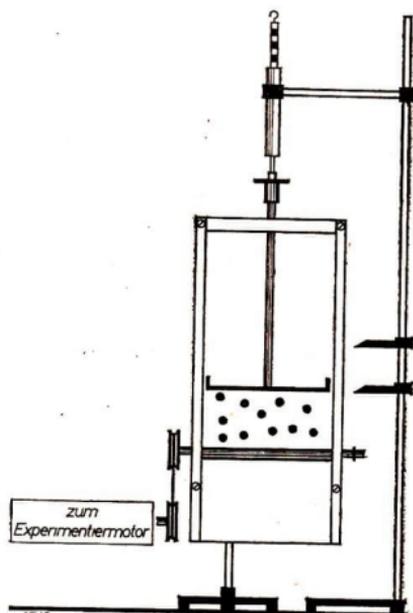


Abb. 2.3.5./2 Aufbau des Gerätes zur kinetischen Gastheorie bei isochoren Zustandsänderungen (rechts)

*Bemerkungen*

1. Der Experimentiermotor muß die Schnurscheibe des Grundgerätes in der vorgesehenen Richtung drehen, damit sie sich nicht löst.
2. Für den Schattenwurf eignet sich die Leuchte der optischen Bank (12 V; 50 W) oder ein Kleinbildprojektor.

### 2.3.6. Bestätigung der Gleichung für isobare Zustandsänderungen eines Gases — Ermittlung des Ausdehnungskoeffizienten

*Variante a*

1. Rundkolben (1000 ml)
2. Dreiweghahn
3. einfach durchbohrter Gummistopfen
4. pneumatische Wanne
5. Becherglas (1000 ml)
6. Tauchsieder
7. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
8. Rührer
9. Maßstab
10. Glasröhre (Innendurchmesser etwa 4 mm; Länge 1000 mm)

*Variante b*

Geräte 1. bis 8., außerdem

11. pneumatische Wanne
12. Meßzylinder (25 ml)
13. gewinkeltes Glasrohr (Innendurchmesser etwa 4 mm; Länge 250 mm)
14. doppelt gewinkeltes Glasrohr (Innendurchmesser etwa 4 mm)

*Variante c*

Geräte 1. bis 10. und 13., außerdem

15. Verbindungsschlauch (Länge etwa 600 mm)

*Methodische Hinweise*

1. Diese Versuche sind zu empfehlen, wenn dem Lehrer das  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät (vgl. V 2.3.4.) nicht zur Verfügung steht.
2. Die Temperaturänderung des Wassers sollte bei allen Varianten durch Verwendung eines Tauchsieders oder durch Zugießen von heißem Wasser herbeigeführt werden. Die letzte Möglichkeit ist günstiger, da der benötigte Zeitaufwand zur Versuchsdurchführung geringer ist. Die jeweilige Temperaturänderung läßt sich in beiden Fällen vorher abschätzen.
3. Da das Volumen bzw. die Volumenänderung bei den Varianten a und c nicht direkt abgelesen werden kann, ist es günstig, wenn die Glasröhre vor Versuchsbeginn kalibriert wird. Den Rauminhalt der Glasröhre kann man leicht berechnen, wenn der Innendurchmesser des Rohres bekannt ist oder hinreichend genau gemessen werden kann. Andernfalls wird empfohlen, die Glasröhre auf folgende Weise zu kalibrieren:

Man füllt die Röhre vollständig mit Wasser, bestimmt das Volumen  $V_0$  der Wassersäule und ermittelt die Länge  $l_0$  der Röhre bzw. der Wassersäule. Durch Division findet man den Umrechnungsfaktor  $E_0 = \frac{V_0}{l_0}$ .

4. Die Varianten a und c liefern recht genaue Werte für die Volumenänderung  $\Delta V$  und sind daher für die Berechnung des kubischen Ausdehnungskoeffizienten geeigneter als die Variante b; letztere hat jedoch den Vorteil, daß die Werte für  $\Delta V$  direkt abgelesen werden können.

Variante a: Benutzung einer waagerechten Glasröhre

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau erfolgt entsprechend der Abbildung 2.3.6./1. In die waagrecht gelagerte Glasröhre läßt man mit Hilfe einer Pipette etwas gefärbtes Wasser laufen. Durch den eingebauten Dreiweghahn ist eine Regulierung der Lage der Sperrflüssigkeit im Glasrohr leicht möglich.

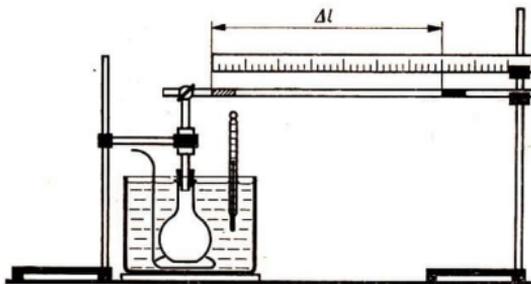


Abb. 2.3.6./1 Versuchsanordnung zu Variante a

Versuch

Die Ausgangswerte für die Temperatur und das Volumen werden festgestellt. Die Temperatur des Wasserbades und damit der abgeschlossenen Gasmenge wird geändert und das Wasser gut umgerührt. Wenn keine weitere Volumenänderung mehr zu beobachten ist, werden die Werte für  $T$  und  $\Delta V$  ermittelt. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt.

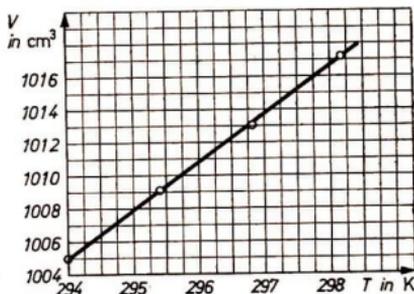
Beispiele für Meßwerte zur Bestätigung der Gleichung für isobare Zustandsänderungen eines Gases

$\vartheta$ in °C	$T$ in K	$\Delta V$ in cm <sup>3</sup>	$V$ in cm <sup>3</sup>	$\frac{V}{T}$ in $\frac{\text{cm}^3}{\text{K}}$
20,9	294,0	—	1005,0	3,42
22,3	295,4	4,1	1009,1	3,42
23,6	296,8	8,0	1013,0	3,41
25,0	298,2	12,2	1017,2	3,41

Das  $V$ - $T$ -Diagramm ergibt eine Gerade (Abb. 2.3.6./2).

Der Quotient  $\frac{V}{T}$  ist konstant (vgl. Tabelle).

Abb. 2.3.6./2 V-T-Diagramm



Es gilt

$$V \sim T \text{ oder}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \dots = \text{konstant.}$$

Ermittlung des Ausdehnungskoeffizienten

Gegeben:

$$V_1 = 1005 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V = 12,2 \text{ cm}^3$$

$$T = 4,1 \text{ K}$$

$$T_1 = 294 \text{ K}$$

$$T_0 = 273 \text{ K}$$

Lösung:

$$\gamma = \frac{T_1 \cdot \Delta V}{V_1 \cdot T_0 \cdot \Delta T}$$

$$\gamma = \frac{294 \text{ K} \cdot 12,2 \text{ cm}^3}{1005 \text{ cm}^3 \cdot 273 \text{ K} \cdot 4,1 \text{ K}}$$

$$\gamma \approx \underline{\underline{0,003 \text{ K}^{-1}}}$$

Gesucht:

 $\gamma$ 

Bemerkung

Zur Herleitung der Gleichung vergleiche Bem. 1 V 2.3.4.!

Variante b: Benutzung eines Meßzylinders

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau erfolgt in Abwandlung der Variante a nach Abbildung 2.3.6/3. Der Meßzylinder wird randvoll mit gefärbtem Wasser gefüllt, in das Wasser der pneumatischen Wanne gestülpt und mit Stativmaterial befestigt. Das Wasser der pneumatischen Wanne und des Meßzylinders sollte Zimmertemperatur besitzen.

Versuch

Die in dem Rundkolben eingeschlossene Luft wird wie bei der Variante a schrittweise erwärmt.

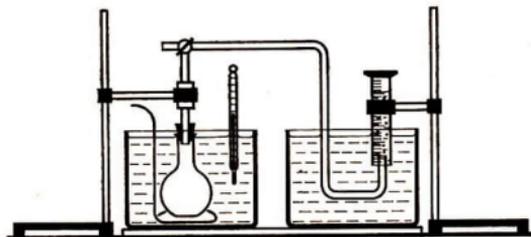


Abb. 2.3.6./3 Versuchsanordnung zu Variante b

Mit der Tabellierung der Meßwerte wird begonnen, nachdem die ersten Luftblasen im Meßzylinder aufgestiegen sind, das gebogene Glasrohr also kein Wasser mehr enthält. Damit entfällt die Notwendigkeit, das Rohr zu kalibrieren. Die Werte für die Volumenänderung  $\Delta V$  sind an der Skale des Meßzylinders direkt abzulesen. Die Meßwerte können wie bei Variante a tabelliert und ausgewertet werden.

*Variante c: Benutzung eines offenen Manometers*

*Versuchsaufbau*

Der Versuchsaufbau erfolgt, wiederum in Abwandlung der Variante a, nach Abbildung 2.3.6./4.

Der Druckausgleich in dem Rundkolben und im Manometer erfolgt vor Versuchsbeginn mittels des Dreiweghahns.

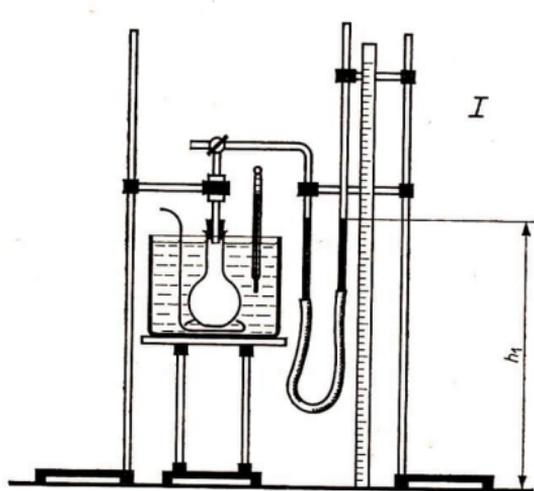


Abb. 2.3.6./4 Versuchsanordnung zu Variante c

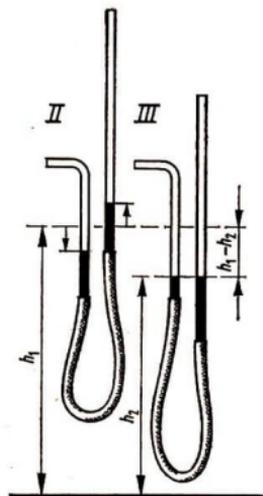


Abb. 2.3.6./5 Stellung der Manometerflüssigkeit nach der Temperaturänderung und während der Bestimmung von  $\Delta V$

*Versuch*

Die in dem Rundkolben eingeschlossene Luft wird schrittweise erwärmt. Die Bedingung  $p = \text{konstant}$  wird jeweils durch Senken der äußeren Manometerrohre bis zum Gleichstand der beiden Flüssigkeitsspiegel des Manometers erreicht. Die Abbildungen 2.3.6./4 und 2.3.6./5 zeigen die Zustände I, II und III, die der Ausgangsstellung, der Veränderung nach dem Erwärmen und der zum Ermitteln von  $\Delta V$  herzustellenden Lage der Manometerrohre entsprechen.

Die Werte für  $\Delta V$ , die  $\Delta h = h_1 - h_2$  proportional sind, werden mit Hilfe des Umrechnungsfaktors, der beim Kalibrieren der Glasröhren des Manometers ermittelt wurde, errechnet.

Die Meßwerte für  $\Delta V$ ,  $V$ ,  $\Delta T$  und  $T$  können wie bei Variante a ausgewertet werden.

#### Bemerkungen

1. Auf die Verwendung des Dreiweghahns bei der Variante a sollte nicht verzichtet werden, damit zum Versuchsbeginn die Lage des Sperrflüssigkeitstropfens bequem eingestellt werden kann.
2. Der Kolben mit dem Gas (im allgemeinen Luft) sollte möglichst vollständig vom Wasserbad umgeben sein, damit die Meßfehler für die Temperatur nicht vergrößert werden.
3. Das Wasser in der waagerechten Röhre (Variante a) bzw. im Meßzylinder (Variante b) bzw. im Manometer (Variante c) sollte wegen des besseren Kontrastes gefärbt sein.
4. Es empfiehlt sich, die kalibrierten Glasröhren aufzubewahren. Dann lohnt sich auch die Herstellung einer Skale, an der die  $\Delta V$ -Werte unmittelbar in  $\text{cm}^3$  abgelesen werden können.

## 2.3.7. Bestätigung der Gleichung für isochore Zustandsänderungen eines Gases — Ermittlung des Spannungskoeffizienten

#### Variante a

1. Pneumatische Wanne
2. Rundkolben (1000 ml)
3. einfach durchbohrter Gummistopfen
4. Laborthermometer (0 °C bis 100 °C)
5. Aneroidbarometer
6. Tauchsieder
7. Becherglas (1000 ml)
8. Rührer

#### Variante b

Geräte wie bei V 2.3.6., Variante c

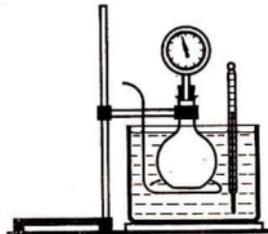


Abb. 2.3.7./1 Versuchsanordnung zu Variante a

#### Methodische Hinweise

1. Dieser Versuch empfiehlt sich, wenn das  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät (vgl. V 2.3.4.) nicht zur Verfügung steht.
2. Die Verwendung des Aneroidbarometers bei Variante a ist besonders vorteilhaft, weil der Druck der abgeschlossenen Gasmenge unmittelbar abgelesen werden kann und weil weiterhin ein einfacher Versuchsaufbau ermöglicht wird. Damit die auftretenden Meßfehler nicht zu groß werden, sollte das Volumen der abgeschlossenen Gasmenge wesentlich größer als das Volumen des Gases sein, das die Vidiose des Aneroidbarometers umgibt.
3. Die Variante b liefert zwar genauere Ergebnisse als die Variante a; Variante a ist aber aus methodischen Gründen vorzuziehen, wenn man lediglich den Zusammenhang zwischen  $p$  und  $T$  ( $p \sim T$ ) nachweisen will.
4. Vgl. MH Nr. 3. von V 2.3.6.!

#### Variante a: Benutzung eines Aneroidbarometers

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 2.3.7./1. Der Rundkolben, auf den das Aneroidbarometer luftdicht aufgesetzt wurde, wird in das Wasserbad getaucht. Wenn keine Temperaturänderung mehr angezeigt wird, können die Ausgangswerte für den Druck  $p$  und die Temperatur  $T$  abgelesen werden.

Anschließend wird die Temperatur des Wasserbades und damit der abgeschlossenen Gasmenge wiederholt geändert und das Wasser jeweils gut umgerührt. Die Meßwerte für  $p$  und  $T$  werden notiert.

*Beispiel für die Meßwerte zur Bestätigung der Gleichung für isochore Zustandsänderungen eines Gases mit dem Aneroidbarometer*

$\vartheta$ in °C	$T$ in K	$\Delta p$ in Torr	$p$ in Torr	$\frac{p}{T}$ in $\frac{\text{Torr}}{\text{K}}$
12,8	286	—	742	2,59
21,0	294	15,8	758	2,58
25,0	298	22,2	764	2,56
28,2	301	29,0	771	2,56
32,0	305	35,5	778	2,55

Unter Benutzung eines in kPa geeichten Druckmessers ergeben sich folgende Werte:

$\vartheta$ in °C	$T$ in K	$\Delta p$ in kPa	$p$ in kPa	$\frac{p}{T}$ in $\frac{\text{kPa}}{\text{K}}$
12,8	286	—	(98,9)	0,35
21,0	294	2,2	101	0,34
25,0	298	3,0	102	0,34
28,2	301	3,9	103	0,34
32,0	305	4,8	104	0,34

Das  $p$ - $T$ -Diagramm ergibt jeweils eine Gerade (Abb. 2.3.7/2 a und b).

Der Quotient  $\frac{p}{T}$  ist konstant (vgl. Tabelle).

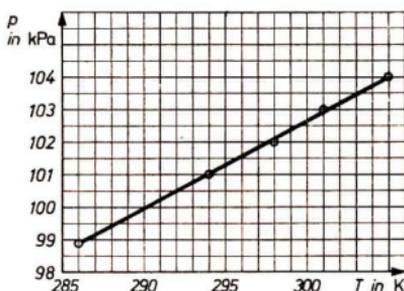
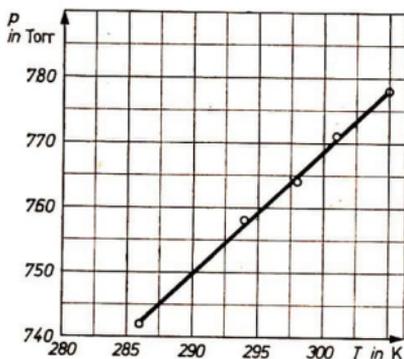


Abb. 2.3.7./2  $p$ - $T$ -Diagramme

Es gilt  $p \sim T$  oder

$$\frac{p_1}{V_1} = \frac{p_2}{V_2} = \dots = \text{konstant.}$$

*Ermittlung des Spannungskoeffizienten*

Gegeben:

$$p_1 = 742 \text{ Torr}$$

$$T_1 = 286 \text{ K}$$

$$T_0 = 273 \text{ K}$$

$$\Delta p = 35,5 \text{ Torr}$$

$$\Delta T = 19,2 \text{ K}$$

Gesucht:

$\beta$

Dieser Wert weicht sehr vom Tabellenwert ab. Daher sollte für die Bestimmung von  $\beta$  der Variante b der Vorzug gegeben werden.

*Bemerkung*

Zur Herleitung der Gleichung vergleiche Bem. 2 V 2.3.4.!

*Variante b: Benutzung eines offenen Manometers*

*Versuchsaufbau*

Der Versuchsaufbau ist der gleiche wie bei V 2.3.6., Variante c. Nur muß in diesem Falle die Ausgangslage der geraden Manometerröhre erheblich tiefer sein.

*Versuch*

Dieser Versuch unterscheidet sich von V 2.3.6., Variante c, lediglich dadurch, daß man zur Ermittlung der Druckänderung  $\Delta p$  bei konstantem Volumen die gerade Manometerröhre nach dem Erwärmen (Zustand II) anhebt, bis die Ausgangshöhe in der gewinkelten Röhre wieder erreicht ist (Zustand III; Abb. 2.3.7./3). Im geraden Rohr steigt dabei der Flüssigkeitsstand über den Ausgangsstand weiter empor. Die Höhendifferenz wird am Manometer abgelesen und ist in die ihr entsprechende Druckdifferenz in Torr oder kPa umzurechnen.

*Bemerkung*

Analog zur Herstellung einer  $\Delta V$ -Skale bei V 2.3.6. (vgl. Bemerkung 4.) ist es bei Variante b günstig, eine in Druckeinheiten geeichte Skale herzustellen.

*Lösung:*

$$\beta = \frac{T_1 \cdot \Delta p}{p_1 \cdot T_0 \cdot \Delta T}$$

$$\beta = \frac{286 \text{ K} \cdot 35,5 \text{ Torr}}{742 \text{ Torr} \cdot 273 \text{ K} \cdot 19,2 \text{ K}}$$

$$\beta \approx 0,003 \text{ K}^{-1}$$

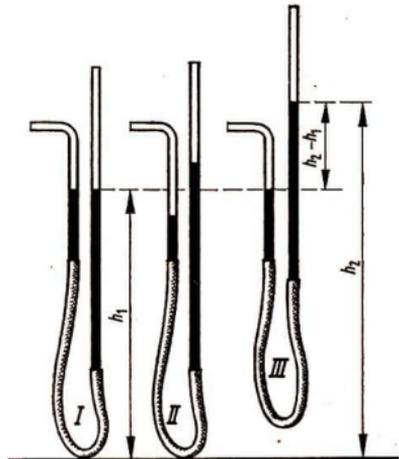


Abb. 2.3.7./3 Stellung der Manometerflüssigkeit nach der Temperaturänderung und während der Bestimmung von  $\Delta p$

### 3. Änderung der Aggregatzustände

#### 3.0. Methodische Bemerkungen

3.0.0. In diesem Kapitel sind Versuche zum Schmelzen und Erstarren, zum Sublimieren, zum Lösen und Kristallisieren sowie zum Verdampfen und Kondensieren zusammengefaßt.

Mehrfach wird auf die Vorteile elektrischer Temperaturmessung hingewiesen, wenn eine objektive Betrachtung der Vorgänge mit anderen Mitteln schwer zu realisieren ist. Anregungen zum Aufbau geeigneter Schaltungen wurden bei den Versuchen 1.1.7. und 1.1.8. gegeben.

3.0.1. In diesem Abschnitt werden Versuche zur Schmelztemperatur bzw. zur Erstarrungstemperatur beschrieben. Während V 3.1.1. und V 3.1.2. zwei einfache Versuche sind, mit denen die Begriffe Schmelz- und Erstarrungstemperatur an den Beispielen Natriumthiosulfat und Stearin eingeführt werden können, bestimmt man in dem Versuch 3.1.3. die Schmelztemperatur von Blei bzw. Zinn. Die Schmelztemperaturen beider Stoffe werden getrennt mehrfach mit Hilfe eines Thermoelements bestimmt. Dabei wird die Größe des Galvanometerauschlages festgestellt, ohne daß die Schmelztemperaturen selbst gemessen werden. Sodann werden die beiden Metalle gemeinsam geschmolzen und die Ausschläge des Galvanometers als Maß für die Schmelztemperatur der Legierung abgelesen. Man erkennt an diesem Beispiel deutlich den Vorzug des Thermoelementes, das es ermöglicht, den Vorgang allen Schülern sichtbar zu machen.

Bei einigen Versuchen benötigt man Eis von 0 °C. Damit die Temperatur des Eises nicht unter 0 °C liegt, läßt man es im zerkleinerten Zustand einige Zeit im Zimmer auf einer feuchtigkeitsaufsaugenden Unterlage liegen.

Bei der Verwendung von zerkleinertem Eis läuft der Wärmeaustausch mit der Umgebung rascher ab; dadurch können Meßfehler geringer gehalten werden. Man beachte jedoch stets, daß sich vor Versuchsbeginn zwischen den Eisstückchen möglichst wenig Schmelzwasser befindet, weil dieses das Resultat stark beeinflussen kann. Mit V 3.1.9. wurde in den Abschnitt ein Versuch zum Gießen mit aufgenommen, der mit einfachsten Mitteln durchführbar ist. Auf Vorschläge für zeitaufwendigere Versuche zum Gießen wurde verzichtet.

3.0.2. In diesem Abschnitt werden im Versuch 3.2.1. einige einfache Möglichkeiten für die Demonstration der Sublimation genannt. Versuch 3.2.2. zeigt, wie man festes Kohlendioxid als Kohlensäureschnee selbst herstellen kann, falls dieses nicht als „Trockeneis“ im Handel zu erwerben ist.

Flaschen mit Kohlendioxid können gegebenenfalls von Brauereien oder Gaststätten ausgeliehen werden.

**3.0.3.** Um Lösen und Kristallisieren geht es im Abschnitt 3.3. Bei den Versuchen 3.3.1. und 3.3.2. läßt sich eine objektive Beobachtung der Vorgänge durch Einsatz des Looserschen Doppelthermoskops, eines Projektionsthermometers oder durch elektrische Temperaturmessungen (vgl. V 1.1.8.) ermöglichen. Das Herstellen von Kältemischungen (V 3.3.3.) wird wohl meist nicht als einzelner Versuch ausgeführt, sondern vielmehr in Verbindung mit solchen Versuchen, in denen niedrige Temperaturen benötigt werden.

**3.0.4.** Im Abschnitt 3.4. werden Versuche zum Verdampfen, Kondensieren und Destillieren beschrieben. Die Versuche 3.4.1., 3.4.3., 3.4.10. sowie einige Varianten von 3.4.6. und 3.4.7. sind als Schülerexperimente geeignet und sollten auch so genutzt werden. Bei den anderen Versuchen ist der gerätetechnische Aufwand sehr groß, oder es besteht erhöhte Unfallgefahr.

Das Modellexperiment zum Wärmeaustauscher kann auch gleichzeitig als Modellversuch für die Wirkungsweise des Kondensators einer Dampfmaschine angesehen werden. Es ermöglicht in einfacher Weise, vom Gegenstrom der strömenden Stoffe zur gleichsinnig laufenden Durchströmung überzugehen und so die Vorzüge des ersteren zu zeigen.

Die Teilversuche und Varianten zum Verdunsten sind durchweg einfacher Art und bilden nur eine Auswahl. Viele davon sind als Hausexperimente geeignet, wobei dann jedoch die Verwendung von Äther nicht vorzusehen ist. Die Versuche zur Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Druck sind vorwiegend qualitativer Art. Bei dem Versuch 3.4.11., Variante c, kann durch den Anschluß eines geeigneten Manometers an den Rezipienten die Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Druck in einem weiten Bereich unterhalb des atmosphärischen Luftdruckes erfaßt werden.

Mit dem Gerät zur kinetischen Gastheorie ist es möglich, die Entwicklung des Modellbegriffs und seine Anwendung auf die Vorgänge des Verdunstens, Siedens und Destillierens zu unterstützen. Dabei ist jedoch zu beachten, daß in der realen Flüssigkeit Kohäsionskräfte wirken, während bei dem Modell die Gewichtskraft die „Teilchen“ in der „Flüssigkeit“ hält. Die Grenzen des Modells lassen sich hierbei gut herausarbeiten.

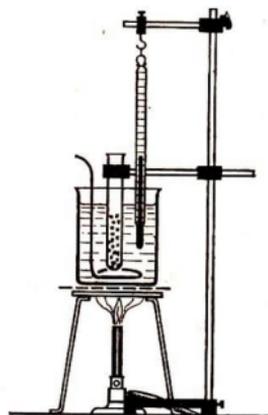
## 3.1. Schmelzen und Erstarren



### 3.1.1. Schmelz- und Erstarrungstemperatur von Natriumthiosulfat oder Natriumazetat

1. Becherglas (600 ml)
2. Reagenzglas
3. Rührer aus Draht
4. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
5. Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtgewebe mit Asbest
6. Reagenzglashalter
7. Natriumthiosulfat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ ) bzw. Natriumazetat ( $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ )

Abb. 3.1.1./1 Ermitteln der Schmelztemperatur von Natriumthiosulfat oder Natriumazetat



*Versuch 1: Bestimmen der Schmelztemperatur*

Ein Reagenzglas wird etwa zur Hälfte mit der zu untersuchenden Substanz gefüllt und an einem Stativ befestigt. Es taucht in ein Wasserbad, das von unten her erwärmt wird. Unter ständigem Umrühren wird die Temperatur des Wasserbades mit einem hereinhängenden Thermometer gemessen (Abb. 3.1.1./1). Wenn sich zwischen den Kristallen die ersten Flüssigkeitstropfen bilden, wird die *Schmelztemperatur* abgelesen. Sie beträgt bei Natriumthiosulfat etwa 48 °C und bei Natriumazetat etwa 58 °C.

*Versuch 2: Bestimmen der Erstarrungstemperatur*

Zum Bestimmen der Erstarrungstemperatur erwärmt man die Schmelze so lange weiter, bis der Inhalt des Reagenzglases klar durchsichtig wird. Man nimmt nun das Reagenzglas aus dem Wasserbad, taucht das Thermometer in die Schmelze ein und beobachtet aufmerksam den Abkühlungsvorgang. Beim Einsetzen des Kristallisationsvorganges liest man die Erstarrungstemperatur ab.

*Bemerkungen*

1. Vorsicht! Man muß damit rechnen, daß das Reagenzglas beim Erstarren der Substanz zerspringt.
2. Die Messung der Erstarrungstemperatur kann auch mittels Widerstandsthermometer oder Thermoelement erfolgen.
3. Man achte beim Abkühlen darauf, daß es zu keiner Unterkühlung der Substanz kommt. Gegebenenfalls „impft“ man die geschmolzene Substanz mit einigen Körnchen des gleichen Stoffes.

**3.1.2. Schmelz- und Erstarrungstemperatur von Stearin**

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| 1. Becherglas (600 ml)                                     | 5. Thermometer (0 °C bis 100 °C) |
| 2. Bunsenbrenner mit Dreifuß<br>und Drahtgewebe mit Asbest | 6. Faden                         |
| 3. Stearinkerze  | 7. Reagenzglashalter             |
| 4. kleines Stück Blei                                      | 8. Reagenzglas                   |
|  | 9. Rührer aus Draht              |

*Methodischer Hinweis*

Obwohl Stearin als amorpher Stoff keine genau angebbare Schmelz- bzw. Erstarrungstemperatur hat, sind die Versuche mit Stearin für die Einführung dieser Begriffe geeignet, zumal hierbei Erfahrungen der Schüler genutzt werden können.

*Versuch 1: Ermitteln der Schmelztemperatur*

Der Versuchsaufbau kann nach Abbildung 3.1.2./1 erfolgen. An den Docht einer etwa 3 cm langen Stearinkerze wird ein kleines Stück Blei gebunden und die so beschwerte Stearinkerze in ein Becherglas mit Wasser gesetzt. Das Wasser wird langsam erwärmt und mit dem Rührer durchmischt. Ein Thermometer zeigt die Temperatur des Wasserbades an. Die Schmelztemperatur ist erreicht, wenn die äußere Schicht der Kerze zu schmelzen anfängt und das flüssige Stearin an die Wasseroberfläche steigt.

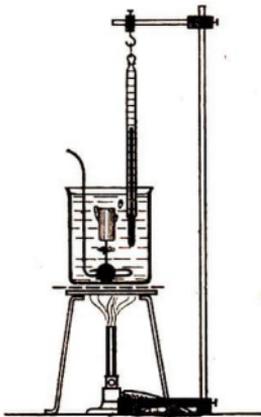


Abb. 3.1.2./1 Ermitteln der Schmelztemperatur von Stearin

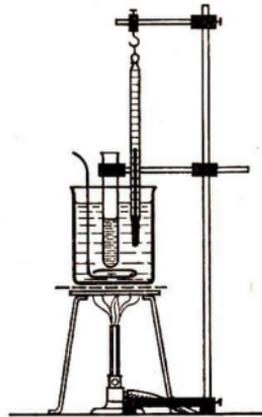


Abb. 3.1.2./2 Ermitteln der Erstarrungstemperatur von Stearin

*Versuch 2: Ermittlung der Erstarrungstemperatur*

Der Versuchsaufbau kann entsprechend Abbildung 3.1.2./2 erfolgen. Ein mit kleinen Stearinstückchen gefülltes Reagenzglas wird in einem Wasserbad erwärmt. Wenn das Stearin restlos geschmolzen ist, entfernt man die Gasflamme. Die Temperatur des Wasserbades und damit auch die des Stearins sinkt allmählich. Mit einem Rührer wird das Wasser gut umgerührt, so daß in ihm überall die gleiche Temperatur herrscht. Die Erstarrungstemperatur ist erreicht, wenn eine leichte Trübung anzeigt, daß das geschmolzene Stearin an den Wänden des Reagenzglases erstarrt.

*Bemerkung*

Den Versuch zur Bestimmung der Schmelztemperatur von Stearin kann man variieren. Man klebt ein Stearinkügelchen an die Spitze eines eisernen Nagels mit breitem Kopf und stellt diesen auf den Boden eines Wassergefäßes. Sobald der Schmelzvorgang einsetzt, löst sich das Kügelchen ab und steigt auf. Um die unerwünschte Wärmeleitung im Nagel zu mindern, kann man den Nagel auf einem kleinen Holzbrettchen befestigen.

### 3.1.3. Vergleich der Schmelztemperatur verschiedener Stoffe mit der ihrer Legierung

1. Thermoelement
2. Spannungsmesser (Meßbereich 30 mV;  $R_i \approx 10 \Omega$ ) oder Spiegelgalvanometer
3. Drehpotentiometer oder Schiebewiderstand (25  $\Omega$ )
4. Schmelzlöffel
5. Klemmenstange
6. Bunsenbrenner
7. Blei, Zinn
8. Untersetzer aus Ton

#### Versuch 1: Untersuchung des Bleis und des Zinns

Ein Thermoelement wird über einen Spannungsteiler an ein Spiegelgalvanometer oder an ein anderes empfindliches Meßgerät angeschlossen. Es wird in der Höhe so eingestellt, daß es in einen Schmelzlöffel taucht, den man über die Flamme eines Bunsenbrenners hält. Als Stütze für den Schmelzlöffel dient ein horizontal befestigter kurzer Stativstab (Abb. 3.1.3./2).

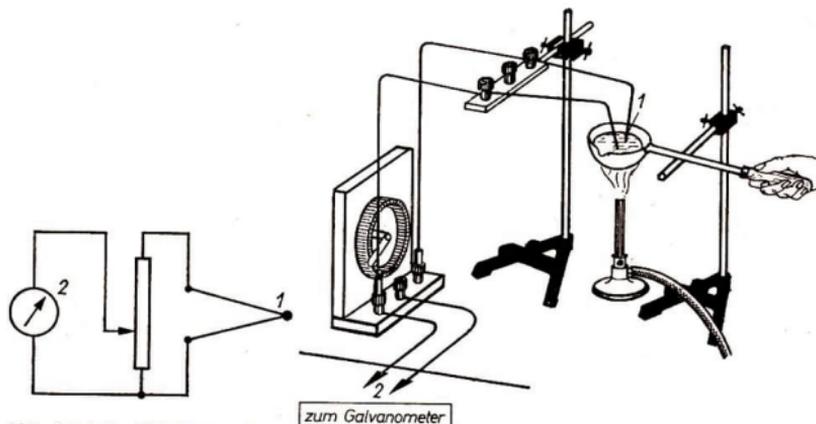


Abb. 3.1.3./1 Schaltung des behelfsmäßigen Thermoelements bei Verwendung eines Spiegelgalvanometers

Abb. 3.1.3./2 Versuchsanordnung zum Vergleich der Schmelztemperaturen von Blei, Zinn und Bleilegierungen unter Verwendung eines Spiegelgalvanometers

Es werden 50 g Blei geschmolzen. Nachdem die Flamme entfernt wurde, taucht man die Lötstelle des Thermoelements in die Schmelze und schließt das Meßgerät an.

Beim Erstarren der Schmelze wird die Lötstelle des Thermoelements mit eingeschlossen. Das Blei wird erneut geschmolzen und der Galvanometerausschlag im Augenblick des Schmelzens abgelesen und notiert. Dann wird die Flamme entfernt und während des Erstarrens wieder der Galvanometerausschlag registriert. Diesen Vorgang wiederholt man mehrfach und bildet den Mittelwert sämtlicher Meßwerte. Schließlich wird das Blei nochmals geschmolzen und in einen Blumentopfuntersetzer aus Ton gegossen.

Auf die gleiche Weise wird der Galvanometeraussschlag für die Schmelztemperatur des reinen Zinns festgestellt. Er liegt etwas unter dem Galvanometeraussschlag für die Schmelztemperatur des Bleis.

#### *Versuch 2: Untersuchung der Legierung von Blei und Zinn*

Beide Metalle werden gemeinsam geschmolzen und durch Schütteln des Schmelzlöffels gründlich vermischt. Danach wird der Galvanometeraussschlag für die Schmelztemperatur der Legierung aus Blei und Zinn bestimmt. Der Versuch zeigt, daß der Galvanometeraussschlag weit tiefer liegt als der für die Schmelztemperatur von Blei bzw. Zinn. Man sieht daraus, daß die Schmelztemperatur der Legierung niedriger ist als die Schmelztemperatur jedes der beiden Metalle.

#### *Bemerkungen*

1. Als Thermoelement eignet sich ein behelfsmäßig hergestelltes Element aus Eisen und Konstantan (vgl. V 1.1.7.).
2. An Stelle von reinem Zinn ist Lötzinn für den Versuch nicht geeignet, da es bereits eine Legierung von Zinn und Blei ist.
3. Damit man den Zeitpunkt des Schmelzens und Erstarrens auch richtig erkennt, ist es zweckmäßig, den Schmelzlöffel während des Erwärmens und des Abkühlens leicht zu schütteln.

### **3.1.4. Aufnahme von Wärmeenergie beim Schmelzen von Eis**

1. Erlenmeyerkolben (50 ml)
2. Eis
3. Bunsenbrenner
4. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
5. Uhr mit Sekundenzeiger oder Zentraluhr

#### *Methodische Hinweise*

1. Der Versuch kann als Einführungsversuch zur Schmelzwärme sehr gut verwendet werden.
2. Der Versuch ist nur qualitativ auswertbar. Man beschränkt sich darauf, über eine Temperaturmessung auf den Bedarf an Wärmeenergie beim Schmelzen zu schließen.
3. Den genauen Zeitpunkt der Beendigung des Schmelzvorganges kann man aus dem Diagramm ablesen, indem man den stark ansteigenden Kurventeil bis zum Schnitt mit der Zeitachse verlängert.

#### *Versuch*

Man zerstößt Eis zu erbsengroßen Stücken und schüttet etwa 40 g in einen 50 ml-Erlenmeyerkolben. In diesen steckt man ein Thermometer und mißt nach kräftigem Umrühren die Temperatur. Sie beträgt 0 °C (Abb. 3.1.4./1).

Man hält den Kolben mit hineingesenktem Thermometer über eine schwache Bunsenbrennerflamme. Nach jeder zweiten Minute liest man die Temperatur ab, wobei man gut umschwenkt. Die Temperaturen trägt man in eine Tabelle ein. Dazu zeichnet man ein Diagramm (Abb. 3.1.4./2).

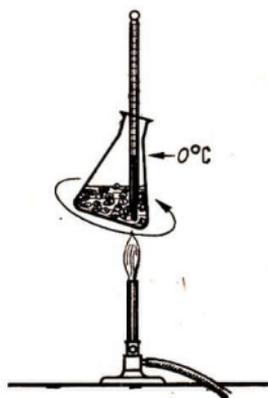


Abb. 3.1.4./1 Schmelzen von Eis in einem Erlenmeyerkolben

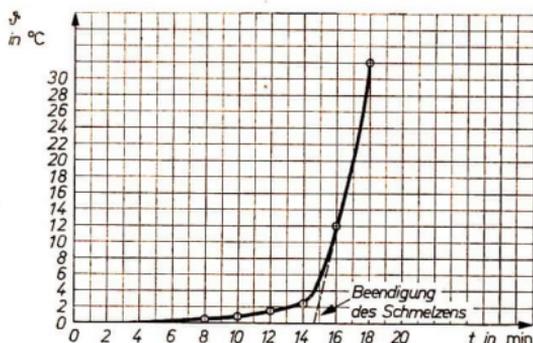


Abb. 3.1.4./2 Temperatur-Zeit-Diagramm für schmelzendes Eis

Zeit $t$ in min	Temperatur $\vartheta$ in $^{\circ}\text{C}$
0	0
2	0
4	0
6	0
8	0,5
10	0,8
12	1,5
14	2,5
16	12,0
18	32,0

Die Temperatur bleibt während der ersten 6 Minuten bei  $0^{\circ}\text{C}$  stehen und steigt danach zunächst nur wenig. Erst nach etwa 14 Minuten steigt die Temperatur schneller an (steiler Kurvenverlauf).

#### Bemerkungen

1. Man kann den Versuch auch so durchführen, daß man in einem weiten Reagenzglas Eisstückchen über der Bunsenbrennerflamme unter ständigem Schütteln erwärmt. Die Temperatur wird mehrmals mit dem Thermometer gemessen. Sie beträgt so lange  $0^{\circ}\text{C}$ , bis der größte Teil des Eises geschmolzen ist.
2. Bei Verwendung eines großen Becherglases und entsprechender Eismengen kann man auch das Schauthermometer verwenden. Man achte darauf, daß der Thermometerkolben nicht den Glasboden berührt und allseitig von schmelzendem Eis umgeben ist. Es empfiehlt sich, zur Kontrolle zusätzlich ein Laborthermometer in die Schmelze zu tauchen.

### 3.1.5. Bestimmung der spezifischen Schmelzwärme des Eises

#### Zu Variante a

1. Becherglas (600 ml) und Becherglas (250 ml) und 3 Korkstücke oder Dewar-Gefäß (350 ml)
2. Waage
3. Wägesatz
4. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
5. Eis
6. Unterlage
7. Filterpapier

#### Zu Variante b

Geräte 4. und 5., außerdem

8. 2 Bechergläser (1000 ml)
9. Meßzylinder (100 ml)
10. Unterlegebrettchen
11. 2 Tauchsieder gleicher Leistung (1000 W)

#### Zu Variante c

Geräte 2., 3. und 5., außerdem

12. 2 Bechergläser (gleichen Fassungsvermögens)
13. 2 Unterlegebrettchen
14. Rührer
15. Tauchsieder oder Bunsenbrenner
16. Laborthermometer (0 °C bis 100 °C; Teilung  $\frac{1}{10}$  K)

#### Methodische Hinweise

1. Die Bestimmung der spezifischen Schmelzwärme von Eis mit dem Mischkalorimeter (Variante a) ist für den Unterricht in Klasse 8 ungeeignet, da die notwendige Berücksichtigung der Wärmekapazität des Kalorimeters für die Schüler dieser Altersstufe sehr schwierig wäre.
2. Die Varianten b und c sind auch als Schülerexperimente geeignet.

#### Variante a

Aus zwei ineinanderpassenden Bechergläsern stellt man behelfsmäßig ein Kalorimeter zusammen und gießt in das innere Gefäß 200 g Wasser, dessen Temperatur etwa 10 K über der Zimmertemperatur liegt. Daneben legt man auf eine wärmedämmende Unterlage und einen zusammengefalteten Bogen Filterpapier einige walnußgroße Eisstücke mit einer Temperatur von 0 °C. Man ergreift die Eisstücke mit einem Bogen Filterpapier, trocknet sie rasch und läßt sie ins Kalorimeter gleiten. Es ist darauf zu achten, daß kein Wasser verspritzt. Man mißt die Temperatur des Wassers, die durch das Schmelzen des Eises absinkt (Abb. 3.1.5./1).

Durch Gleichsetzen der vom warmen Wasser sowie vom Gefäß abgegebenen und der vom Eis beim Schmelzen sowie vom Schmelzwasser aufgenommenen Wärmeenergie ergibt sich die Gleichung:

$$(m_1 \cdot c_1 + C) \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) = m_2 \cdot q_s + m_2 \cdot c_1 \cdot \Delta\vartheta.$$

Hierin bedeuten:

- $m_1$  — Masse des wärmeren Wassers
- $c_1$  — spezifische Wärmekapazität des Wassers
- $C$  — Wärmekapazität des Kalorimeters (vgl. V 1.3.5.)
- $\vartheta_1$  — Anfangstemperatur des Wassers
- $\vartheta_2$  — Endtemperatur des Wassers
- $\Delta\vartheta$  — Differenz zwischen  $\vartheta_2$  und der Temperatur des Eises ( $0^\circ\text{C}$ )
- $m_2$  — Masse des Eises
- $q_s$  — spezifische Schmelzwärme des Eises

Die Masse des Eises bestimmt man durch Wägung. Sie ergibt sich aus der Differenz der Masse des Kalorimeters mit Inhalt vor der Hinzugabe von Eis und hinterher. Für  $q_s$  gilt:

$$q_s = \frac{(m_1 \cdot c_1 + C) \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2)}{m_2} - c_1 \cdot \Delta\vartheta.$$

Man findet:

$$q_s \approx 330 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Dieser Wert ist etwas kleiner als der Tabellenwert, da das Eis nicht ganz frei von Schmelzwasser ist, wenn man es in das Kalorimeter einbringt.

Man kann statt des behelfsmäßigen Kalorimeters auch ein Laborkalorimeter oder ein Dewar-Gefäß verwenden.

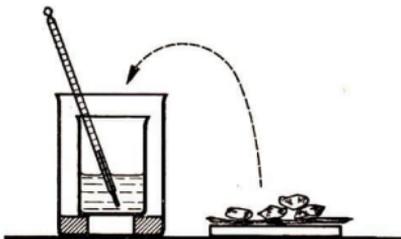


Abb. 3.1.5./1 Bestimmung der Schmelzwärme mit einem behelfsmäßigen Kalorimeter

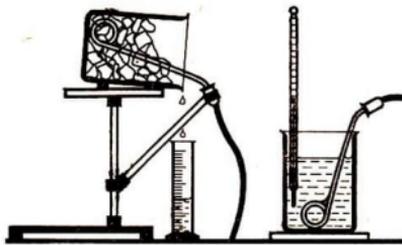


Abb. 3.1.5./2 Bestimmung der Schmelzwärme unter Verwendung von Tauchsiedern

#### Variante b

In das eine Becherglas gießt man 1 l Wasser mit einer Temperatur von etwa  $10^\circ\text{C}$ . Das andere Becherglas wird bis zur gleichen Höhe mit zerkleinertem Eis gefüllt. In jedes Glas bringt man einen Tauchsieder. Das Eis soll den Heizkörper des Tauchsieders fest umgeben.

Nun legt man das mit Eis gefüllte Becherglas auf ein Rundtischchen und befestigt es mit einem Glasröhrenhalter am Stativ. Es wird in dieser Lage zusätzlich durch Keile festgehalten. Auch der Tauchsieder ist mit einer Rohrklemme am Stativ befestigt. Nun wird das Stativ so geneigt, daß das Schmelzwasser aus dem Becherglas laufen kann.

Das Becherglas mit Wasser stellt man auf das Unterlegebrettchen. Die Wassertemperatur wird bestimmt und der Meßzylinder zum Auffangen des Schmelzwassers unter das Becherglas geschoben (Abb. 3.1.5./2). Gleichzeitig legt man an beide

Tauchsieder für 15 s bis 20 s die Netzspannung an (vgl. Bem. 3). Dabei werden in beiden Bechergläsern gleiche Energiebeträge umgewandelt. In dem einen Glas wird die aus Elektroenergie gewonnene Wärmeenergie zum Schmelzen des Eises, im anderen zum Erwärmen des Wassers benutzt. Nach Ausschalten des Stromes läßt man die beiden Tauchsieder noch etwa 2 Minuten im Wasser und im Eis abkühlen.

Jetzt mißt man das Volumen des Schmelzwassers im Meßzylinder und nach kurzem Umrühren die Temperatur des Wassers im anderen Becherglas.

Aus der Temperaturerhöhung des erwärmten Wassers und der Masse des geschmolzenen Eises läßt sich die spezifische Schmelzwärme des Eises berechnen.

*Beispiel für eine Messung*

Wasser

Schmelzwasser des Eises

Gegeben:

$$m_{\text{Eis}} = 50 \text{ g}$$

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ g}$$

$$\Delta\vartheta \approx 4 \text{ K}$$

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = 4,2 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}}$$

Gesucht:

$q_s$  = spezifische Schmelzwärme des Eises

In guter Näherung kann man die vom Wasser aufgenommene Wärmeenergie mit der vom Eis beim Schmelzen aufgenommenen Wärmeenergie gleichsetzen.

$$m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta\vartheta = m_{\text{Eis}} \cdot q_s$$

$$q_s = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta\vartheta}{m_{\text{Eis}}}$$

$$q_s \approx \frac{1000 \text{ g} \cdot 4,2 \text{ J} \cdot 4 \text{ K}}{50 \text{ g} \cdot \text{g} \cdot \text{K}}$$

$$q_s \approx 340 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$$

$$q_s \approx 340 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Ergebnis: Die spezifische Schmelzwärme beträgt  $\approx 340 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

*Variante c*

Man gießt in ein Becherglas, das etwa bis zur Hälfte mit zerkleinertem Eis von  $0^\circ\text{C}$  gefüllt ist, Wasser gleicher Masse mit einer Temperatur von etwa  $100^\circ\text{C}$  und rührt so lange, bis das Eis restlos geschmolzen ist (Abb. 3.1.5./3). Es ergibt sich eine Endtemperatur der Mischung von etwa  $10^\circ\text{C}$ . Aus der Wärmeenergie, die vom heißen Wasser abgegeben und vom Eis zum Schmelzen sowie vom Schmelzwasser zum Erwärmen aufgenommen worden ist, läßt sich die spezifische Schmelzwärme von Eis wie folgt berechnen, wenn man die „Wärmeenergieverluste“ nicht berücksichtigt:

$$m \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) = m \cdot q_s + m \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \vartheta_2$$

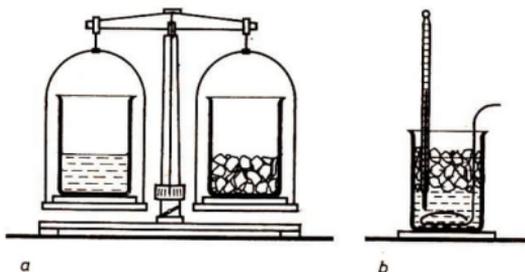


Abb. 3.1.5./3 Bestimmung der Schmelzwärme durch Mischen gleicher Mengen Wasser und Eis  
a) Ermitteln der Massen  
b) Mischen

Hierin bedeuten:

- $m$  — Masse des Wassers bzw. des Eises
- $c_{\text{H}_2\text{O}}$  — spezifische Wärmekapazität des Wassers
- $\vartheta_1$  — Temperatur des warmen Wassers
- $\vartheta_2$  — Endtemperatur der Mischung
- $q_s$  — spezifische Schmelzwärme des Eises

Folglich ist:  $q_s = c_{\text{H}_2\text{O}}[(\vartheta_1 - \vartheta_2) - \vartheta_2] = c_{\text{H}_2\text{O}}(\vartheta_1 - 2\vartheta_2)$

Man erhält:  $q_s \approx 340 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

*Bemerkungen*

1. Damit das Eis nicht kälter als  $0^\circ\text{C}$  ist, läßt man es vor dem Versuch einige Zeit im Zimmer liegen.
2. Bei der Verwendung von zerkleinertem Eis läuft der Prozeß zwar rascher ab, aber zwischen den Eisstückchen ist dann von vornherein relativ viel Schmelzwasser enthalten. Ist es auch der Masse nach nicht von Bedeutung, so enthält es doch bereits die sehr hohe Schmelzwärme, verfälscht also das Resultat um das 340fache seines Anteils an der Gesamtmasse.
3. Die Zeitangabe bezieht sich auf Tauchsieder der Leistung 1000 W. Bei geringerer Leistung sind die Zeiten entsprechend zu verlängern.
4. Die Variante c kann noch dadurch abgeändert werden, daß man zum Eis Wasser gleicher Masse mit einer Temperatur von  $80^\circ\text{C}$  hinzugießt. Dann müßte sich eine Mischungstemperatur von  $0^\circ\text{C}$  ergeben. Die vom Wasser abgegebene Wärmeenergie wird in diesem Falle nur zum Schmelzen des Eises gebraucht.

### 3.1.6. Volumenzunahme des Wassers beim Erstarren

*Zu Variante a*

1. Reagenzglas
2. Becherglas (600 ml)
3. Kochsalz
4. Eis
5. Unterlage

*Zu Variante b*

6. Loosersches Doppelthermoskop mit Kapsel mit Teilung und Einsatz zur Eiserzeugung
7. Gasschlauch
8. Verbindungsstück
9. Äther

*Variante a: Erstarren des Wassers zu einer Eissäule*

Man füllt ein Reagenzglas etwa 10 cm hoch mit Wasser und markiert den Wasserstand, z. B. durch einen außen herumgelegten Gummiring. Das Reagenzglas steckt man unverschlossen in eine Kältemischung (vgl. V 3.3.3.). Nachdem das Wasser vollständig gefroren ist, nimmt man das Reagenzglas heraus und findet, daß die

entstandene Eissäule die Wassersäule um  $\frac{1}{10}$  ihrer Länge überragt. Es hat eine Volumenzunahme stattgefunden; die Dichte hat sich von  $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  auf rund  $0,9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  verringert (Abb. 3.1.6./1).

*Variante b: Verwendung der Kapsel eines Looserschen Doppelthermoskops*

In eine zum Looserschen Thermoskop gehörende Kapsel mit Teilung werden einige Tropfen Wasser eingebracht. Der zum Thermoskop gehörende Einsatz zur Eiszerzeugung wird etwa zu zwei Dritteln mit Äther gefüllt und in die Kapsel gesetzt (Abb. 3.1.6./2). Das Wasser soll im Zwischenraum zwischen der Kapselwand und dem Einsatz höchstens bis zur halben Höhe stehen. Das gewinkelte Rohr des Einsatzes wird über ein Verbindungsstück an die Gasleitung angeschlossen. Das Gas steigt

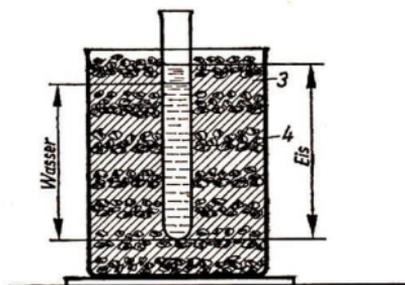


Abb. 3.1.6./1 Erstarren des Wassers zu einer Eissäule

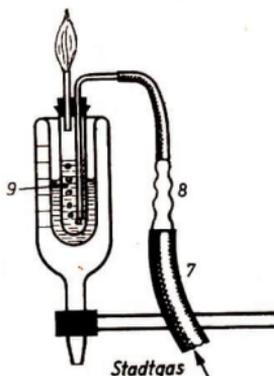


Abb. 3.1.6./2 Nachweis der Volumenzunahme des Wassers beim Erstarren

im Äther in Blasen empor und bringt ihn zum Teil zum Verdunsten. Das ausströmende Gas-Äther-Gemisch wird an der Spitze des Ausströmrohres entzündet, wenn die gesamte Luft aus dem Reagenzglas verdrängt ist. Die Gaszufuhr wird so geregelt, daß die Flamme etwa 3 cm hoch brennt.

Durch Verdunsten des Äthers sinkt in der Kapsel die Temperatur; nach etwa 5 Minuten erstarrt das Wasser. Im Augenblick des Erstarrens kann man ein Ansteigen der Oberfläche um etwa zwei bis drei Millimeter sehen.



### 3.1.7. Zersprengen einer Gefrierbombe

1. Gefrierbombe
2. Verschlußschraube mit Lederdichtung
3. Eisen- oder Aluminiumtopf
4. Kochsalz
5. Eis

#### Versuch

Die Gefrierbombe ist eine Hohlkugel aus Grauguß mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Wanddicke von etwa 6 mm. Ihre Füllöffnung ist mit einem Gewinde versehen. Als Verschluß dient eine Kreuzlochschaube mit einer Lederscheibe als Dichtung (Abb. 3.1.7./1).

Die Gefrierbombe wird mit kaltem Wasser gefüllt — am günstigsten mit einer Temperatur von 4 °C — und dicht verschlossen. Dabei ist darauf zu achten, daß keine

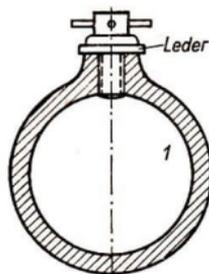


Abb. 3.1.7./1 Schnitt durch eine Gefrierbombe

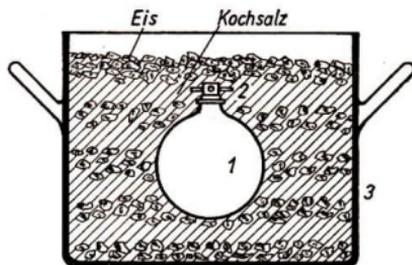


Abb. 3.1.7./2 Gefrierbombe in einer Kältemischung

Luftblasen eingeschlossen werden. Man setzt die Gefrierbombe in eine Kältemischung aus Eisstückchen und Kochsalz (vgl. V 3.3.3.), die man in einem Kochtopf vorbereitet hat (Abb. 3.1.7./2).

Vorsicht! Das Gefäß muß zum Schutz vor Splintern mit einem beschwerten Brett abgedeckt werden!

Wenn sich das Wasser in der Gefrierbombe auf 0 °C abgekühlt hat und erstarrt, zersprengt es die Bombe mit einem Knall.

#### Bemerkungen

1. Falls der Versuch nicht gelingt (Kugel wird nicht gesprengt), darf die Kugel erst aus dem Gefäß genommen werden, wenn alles Eis geschmolzen ist und die Wassertemperatur in der Kugel mit Sicherheit höher als 0 °C ist.
2. Statt einer Gefrierbombe kann man auch eine Flasche aus Glas verwenden. Besonders geeignet sind Flaschen mit einem Schraubverschluß. Wird eine Flasche mit Korkstopfen verwendet, so muß man den Stopfen mit Draht festbinden (Vorsicht vor Glassplintern!).
3. Statt des Topfes kann man auch einen Eimer oder einen Holzbottich verwenden. Ein Becherglas würde jedoch zersprengt werden.
4. Man darf die Flüssigkeit, die zum Füllen der Bombe dient, nicht von einer Kältemischung abgießen, weil eine Salzlösung erst bei tieferer Temperatur erstarrt als reines Wasser.

### 3.1.8. Volumenabnahme des Stearins beim Erstarren

1. Becherglas (100 ml)
2. 2 Bechergläser (600 ml)
3. Bunsenbrenner
4. Dreifuß
5. Drahtgewebe mit Asbest
6. dünne Schnur
7. Glasstab
8. Stearin

#### Methodischer Hinweis

Dieser Versuch kann als Vorversuch zu V 3.1.9. dienen.

#### Versuch

Klein geschnittenes Stearin wird in ein kleines Becherglas gefüllt, das an einer Schnur in ein Wasserbad gehängt wird. In diesem wird das Stearin erwärmt, bis es geschmolzen ist. Das kleine Becherglas mit der Schmelze wird aus dem Wasserbad gehoben und in ein Glas mit kaltem Wasser gesetzt (Abb. 3.1.8./1). Das Stearin er-

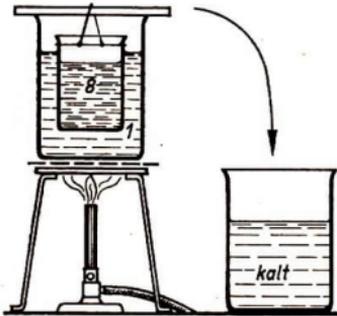


Abb. 3.1.8./1 Schmelzen von Stearin im Wasserbad

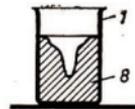


Abb. 3.1.8./2 Schnitt durch das erstarrete Stearin

starrt zuerst an den Glaswänden, die mit dem kalten Wasser in Berührung kommen, und erst allmählich auch im Innern. An dem fest gewordenen Stearin läßt das Einsinken der Oberfläche deutlich erkennen, daß sein Volumen beim Erstarren stark abgenommen hat (Abb. 3.1.8./2).



### 3.1.9. Modellexperiment zum Gießen

1. Blumentopf
2. feiner Sand
3. Gießlöffel
4. Bunsenbrenner
5. Blei
6. Profilkörper als Gießmodell  
(Länge etwa 100 mm), und zwar
  - a) Holzwalze ( $\varnothing$  10 mm)
  - b) Vierkantholz (10 mm  $\times$  10 mm  $\times$  10 mm)
  - c) dickwandiges Eisenrohr ( $\varnothing$  25 mm bis 30 mm)

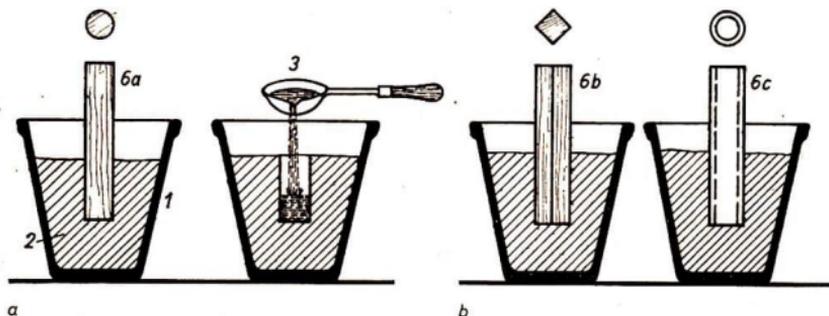


Abb. 3.1.9./1 Durchführen des Modellversuchs zum Gießen  
a) mit einer Holzwalze b) mit einem Vierkantholz und mit einem Eisenrohr

### Methodischer Hinweis

Als Vorversuch kann V 3.1.8. dienen.

### Versuch

In einen Blumentopf drückt man durchgefuchteten, feinen Sand ein. In diesen wird senkrecht nach unten eine glatte Holzwalze etwa 3 cm tief hineingepreßt, wobei der Sand verdrängt wird. Aus der so entstandenen Höhlung wird die Walze unter leichter Drehung behutsam herausgezogen, so daß die Begrenzungsflächen der Vertiefung nicht beschädigt werden. Man schmilzt in einem Gießlöffel eine ausreichende Menge Blei und gießt das geschmolzene Blei in die Vertiefung (Abb. 3.1.9./1a). Nach kurzer Zeit ist es erstarrt und kann herausgenommen werden. In ähnlicher Weise wie die Holzwalze lassen sich auch andere Profile, zum Beispiel ein Vierkantholz und ein kurzes Rohr, verwenden (Abb. 3.1.9./1b).

## 3.2. Sublimieren

### 3.2.1. Sublimation von Ammoniumchlorid, Kampfer und Naphtalin

- |                      |   |
|----------------------|---|
| 1. Reagenzglas       | 3. Bunsenbrenner                          |
| 2. Reagenzglashalter | 4. Ammoniumchlorid, Kampfer und Naphtalin |

### Methodischer Hinweis

Erscheinungen zur Sublimation sind den Schülern nicht unbekannt, und diese Tatsache sollte unbedingt bei der Auswertung des Versuchs oder zur Motivation für den Versuch genutzt werden. Die Schüler wissen aus Erfahrung, daß auch „gefrorene“ Wäsche trocknet und daß im Winter die Schnee- und Eisdecke von Tag zu Tag dünner wird, auch wenn die Temperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$  liegen. Wasserdampf *condensiert* bei der Raureifbildung unmittelbar in den festen Zustand.

### Versuch

Das Ammoniumchlorid (oder Kampfer oder Naphtalin) erwärmt man in einem Reagenzglas vorsichtig über einer mäßigen Bunsenbrennerflamme. Das Salz geht,

ohne flüssig zu werden, unmittelbar in den gasförmigen Zustand über. Im oberen, kälteren Teil schlägt es sich in fester Form nieder.

#### Bemerkungen

1. Weitere Versuche zur Sublimation sind V 3.2.2. und 3.3.3.
2. Es ist zu beachten, daß die Wärmeenergie (Sublimationswärme), die aufgebracht werden muß, um Naphthalin aus dem festen in den gasförmigen Zustand zu überführen, geringer ist als bei Kampher und Ammoniumchlorid.



### 3.2.2. Erzeugen von Kohlendioxidschnee

1. Gefüllte Kohlendioxid-Stahlflasche
2. ausgekehrter, etwa 250 mm hoher Holzklötz
3. 2 keilförmig zugeschnittene, 100 mm hohe Holzklötze
4. Nippel zum Flaschenventil aus Messing, hergestellt aus einem etwa 20 mm dicken und 130 mm langen Rohr
5. Flanellbeutel (etwa 200 mm × 300 mm)
6. Schraubenschlüssel für das Flaschenventil
7. Dewar-Gefäß
8. Holz- oder Hornlöffel

#### Versuch

Eine gefüllte Kohlendioxid-Stahlflasche wird auf einem Tisch so gelagert, daß der Boden erhöht liegt und das Ventil etwas über die Tischplatte hinausragt. Damit die Flasche nicht wegrollen kann, werden dem Flaschenkopf seitlich zwei keilförmige Holzklötze vorgelegt. An das Ventil schraubt man einen Nippel und bindet an ihm mit einer kräftigen Schnur den Beutel fest (Abb. 3.2.2./1).

Das Ventil wird allmählich ganz geöffnet. Unter starkem Brausen fließt das flüssige Kohlendioxid aus und geht teilweise in festes Kohlendioxid über, das sich in dem Beutel ansammelt. Die Ausbeute wird dadurch erhöht, daß man ab und zu mit

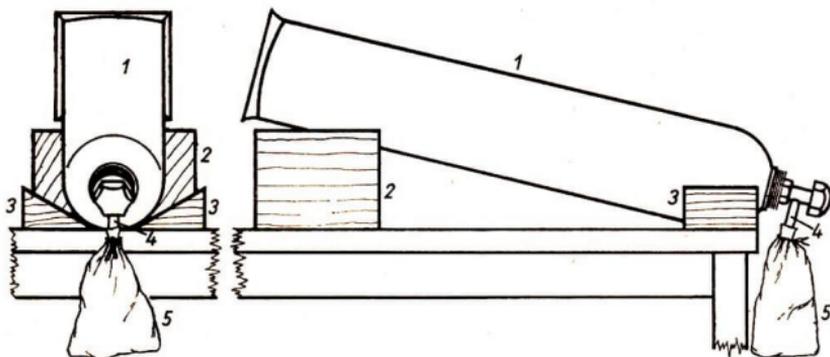


Abb. 3.2.2./1 Vorrichtung zum Ablassen von Kohlendioxidschnee aus einer Kohlendioxid-Stahlflasche

einem Holzstück an den Beutel klopft. Hat sich genügend Schnee gebildet, so wird das Flaschenventil geschlossen und die Flasche senkrecht gestellt. Nach einigen Minuten muß das Ventil nochmals nachgezogen werden. Den Schnee schaufelt man mit Hilfe eines Holzlöffels oder eines Hornlöffels in ein Dewar-Gefäß. Die Temperatur des Kohlendioxidschnees beträgt  $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Bemerkungen*

1. Die Flasche darf man auf keinen Fall hinfallen lassen (Explosionsgefahr!).
2. Da sich das Ventil stark abkühlt, darf man es nicht mehr mit der Hand anfassen. Man verwendet am besten zum Nachziehen den Schraubenschlüssel.
3. Wenn man den Schnee nicht drückt, kann man ihn vorübergehend mit der Hand anfassen. Beim Ausüben eines Druckes entstehen Blasen, die Brandblasen ähnlich sind. Es ist daher beim Experimentieren mit Kohlendioxidschnee Vorsicht geboten.



### 3.2.3. Versuche mit Kohlendioxidschnee

*Zu Versuch 1*

1. Dewar-Gefäß mit Kohlendioxidschnee
2. Eisen- oder Porzellanlöffel
3. durchlöcherter Metalldose
4. Kieselstein
5. Becherglas

*Zu Versuch 2*

Geräte 1. und 2., außerdem

6. Abdampfschale aus Porzellan ( $\varnothing$  60 mm)
7. Sandbadschale aus Eisen ( $\varnothing$  150 mm) mit Sand
8. Petroleum

*Zu Versuch 3*

Geräte 1. und 2., außerdem

9. dünnwandiges Reagenzglas ( $\varnothing$  16 mm)
10. Gummistopfen
11. Standzylinder mit Deckel ( $\varnothing$  60 mm; Länge 200 mm)

*Zu Versuch 4*

Gerät 1., außerdem

12. Äther
13. Abdampfschale aus Porzellan
14. Thermometer ( $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
15. Reagenzglas ( $\varnothing$  12 mm) oder
16. einseitig verschlossene Blechröhre ( $\varnothing$  10 mm)
17. Quecksilber
18. Quecksilberbrett
19. Eisendraht
20. Hammer
21. Standzylinder ( $\varnothing$  100 mm)
22. Glasstab

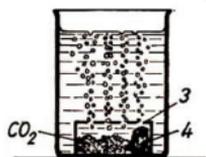


Abb. 3.2.3./1 Verdampfen von festem Kohlendioxidschnee



Abb. 3.2.3./2 Löschen einer Flamme durch Kohlendioxidschnee



Abb. 3.2.3./3 Explosion eines Reagenzglases durch Sublimieren von Kohlendioxidschnee



#### Versuch 1: Erzeugen von gasförmigem Kohlendioxid

In eine durchlöchernte Metalldose füllt man etwas Kohlendioxidschnee. Man verschließt die Dose durch einen Deckel und schließt zum Beschweren einen Kieselstein mit ein. Die Büchse bringt man auf den Boden eines mit Wasser gefüllten Becherglases. Man beobachtet einen kräftigen Gasstrom des entweichenden gasförmigen Kohlendioxids (Abb. 3.2.3./1).

#### Versuch 2: Löschen einer Flamme

Man füllt eine Porzellanschale mit Petroleum und stellt sie in eine größere eiserne Schale, die mit Sand gefüllt ist. Das Petroleum entzündet man durch Bestreichen mit einer Bunsenbrennerflamme. Wenn es mit kräftiger Flamme brennt, gibt man mit einem eisernen Löffel etwas Kohlendioxidschnee auf das Petroleum. In kurzer Zeit wird die Flamme durch das gasförmige Kohlendioxid erstickt (Abb. 3.2.3./2).

#### Versuch 3: Explosion eines Reagenzglases

Ein Reagenzglas wird etwa zur Hälfte mit Kohlendioxidschnee gefüllt und durch einen Gummistopfen fest verschlossen. Man bringt das Reagenzglas in einen dickwandigen Glaszylinder und bedeckt ihn mit einem Deckel. Nach einiger Zeit wird das Reagenzglas durch den hohen Druck des gasförmigen Kohlendioxids zertrümmert, das infolge Erwärmung durch Sublimation entsteht (Abb. 3.2.3./3).



#### Versuch 4: Herstellen einer Kältemischung aus Kohlendioxidschnee und Äther — Erstarren von Quecksilber

Man schüttet in ein Dewar-Gefäß etwas Kohlendioxidschnee und gießt langsam Äther darüber, bis ein mäßig fester Brei entsteht. Die Temperatur sinkt bis auf  $-78^{\circ}\text{C}$  ab. An Stelle von Äther kann man auch Azeton oder Alkohol verwenden. Ein Reagenzglas wird zur Hälfte mit Quecksilber gefüllt. In das Quecksilber taucht man einen Eisendraht, dessen unteres Ende rechtwinklig umgebogen ist und dessen oberes Ende eine Öse trägt. Das Reagenzglas wird in das Kohlendioxid-Äther-Gemisch gestellt. Nach einiger Zeit ist das Quecksilber zu einem festen Block erstarrt (Abb. 3.2.3./4a). Es wird an dem Eisendraht aus dem Reagenzglas gezogen. Man kann den Quecksilberblock wie einen anderen Metallblock hämmern. Wegen der Giftigkeit des Quecksilbers kürze man den Versuch nach Möglichkeit ab. **Vorsicht!** Keine Quecksilberdämpfe einatmen!

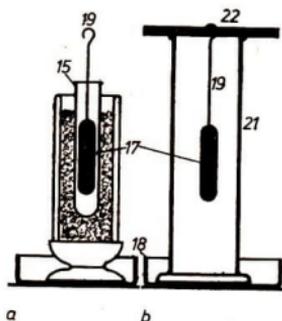


Abb. 3.2.3./4 a) Erstarren von Quecksilber in der Kältemischung b) Verflüssigen des Quecksilbers

Hängt man das Quecksilber an einen über die Öffnung eines Standzylinders gelegten Glasstab und läßt es längere Zeit bei Zimmertemperatur stehen (Abb. 3.2.3./4b), so beginnt das Quecksilber nach genügender Erwärmung langsam abzutropfen. Schneller kann man das Quecksilber wieder verflüssigen, wenn man den Block in Wasser eintaucht. Umgekehrt kann man das Erstarren des Quecksilbers beschleunigen, wenn man an Stelle des Reagenzglases eine kleine, einseitig verschlossene Blechröhre verwendet.

### 3.3. Lösen und Kristallisieren

#### 3.3.1. Nachweis der Lösungswärme

*Zu Variante a* [SE]

1. Becherglas (250 ml)
2. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
3. Rührer
4. Ammoniumnitrat ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) oder Kaliumnitrat ( $\text{KNO}_3$ ) oder Natriumsulfat ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) oder Ammoniumchlorid ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ )

*Zu Variante b*

- Geräte 1., 3. und 4., außerdem
5. Thermistor
  6. Spannungsquelle
  7. Strommesser

*Zu Versuch c*

- Geräte 2. bis 4., außerdem
8. Loosersches Doppelthermoskop mit Kapsel mit Meßteilung
  9. Natriumthiosulfat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )

*Methodischer Hinweis*

Für den Nachweis der Lösungswärme verschiedener Stoffe bietet sich die elektrische Temperaturmessung mittels Thermistor (Variante b) bzw. die Verwendung

eines Looserschen Thermoskops (Variante c) an. Der Vorgang kann somit auf eine größere Entfernung sichtbar gemacht werden, als es beim Benutzen eines Flüssigkeitsthermometers der Fall wäre.

#### Variante a

In das Becherglas gießt man etwa 100 g Wasser und löst dann unter ständigem Umrühren etwa 50 g bis 100 g von einer der oben angegebenen Substanzen. Mit dem Thermometer stellt man Temperaturabnahmen fest, die 30 K betragen können.

#### Variante b

Statt eines Thermometers benutzt man zur Temperaturmessung eine Meßanordnung entsprechend V 1.1.8., Versuch 2. Man beachte dabei, daß man den zu verwendenden Thermistor einschließlich der Zuleitungen mit einer Lackschicht versieht, um unerwünschte Ströme in den entstehenden Elektrolyten zu verhindern.

#### Variante c

Die zum Thermoskop gehörende Kapsel wird etwa zur Hälfte mit Wasser gefüllt und mit einem Manometer des Thermoskops verbunden. Wenn sich die Flüssigkeitssäule des Manometers nicht mehr verschiebt, öffnet man für kurze Zeit den Glashahn am Thermoskop und stellt so Druckausgleich her. Die Flüssigkeitssäule stellt sich auf die Nullmarke der Skale ein (Abb. 3.3.1./1). Man schüttet etwa einen

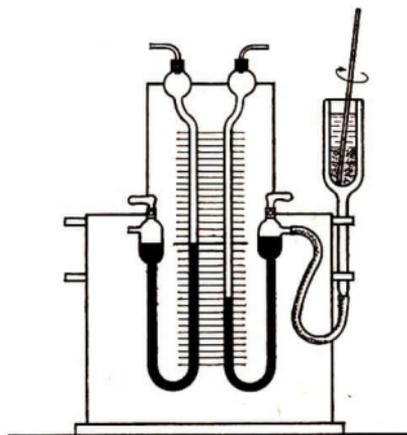


Abb. 3.3.1./1 Qualitativer Nachweis der Lösungswärme (Die Kapsel ist im Verhältnis zu groß gezeichnet)

Teelöffel voll Salz, am besten Natriumthiosulfat, in die Kapsel und löst die Kristalle unter Umrühren mit einem Glasstäbchen im Wasser auf. Die Flüssigkeitssäule des Thermoskops sinkt und zeigt damit eine Wärmeenergieaufnahme beim Auflösen des Salzes an.

#### Bemerkungen

1. Gute Sichtbarkeit erzielt man auch mit einem Projektionsthermometer.

Das mit Quecksilber oder einer gefärbten Flüssigkeit gefüllte Thermometer besitzt eine

durchsichtige Skale mit umgekehrten und seitenverkehrten Zahlen, die bei der Projektion aufrecht erscheinen. Der Aufbau läßt sich mit dem Tageslichtschreibprojektor und dem Zusatzgerät für Vertikalprojektion sehr schnell durchführen.

2. Man beachte auch die Hinweise zu V 3.3.2., Variante d.
3. Zur Verwendung der Geräte 5. bis 7. bei der Variante b beachte man die entsprechenden Ausführungen bei V 1.1.8.

### 3.3.2. Kristallisationswärme von Natriumthiosulfat oder Natriumazetat — Unterkühlen

*Zu Variante a*

1. Reagenzglas ( $\varnothing$  16 mm)
2. Reagenzglashalter
3. Becherglas (600 ml)
4. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
5. Rührer
6. Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtgewebe mit Asbest
7. Natriumthiosulfat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ ) oder Natriumazetat ( $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ )

*Zu Variante b*

Gerät 7., außerdem

8. Loosersches Doppelthermoskop mit Kapsel mit Meßteilung und Reagenzglas

*Zu Variante c*

Geräte 1. bis 7., außerdem

9. Thermoelement und Spiegelgalvanometer oder Thermistor und Spannungsquelle und Strommesser

*Zu Variante d*

Geräte 2. bis 7., außerdem

10. Punktlichtlampe mit Kondensator und Projektionslinse oder Tageslichtschreibprojektor mit Zusatzgerät für Vertikalprojektion

#### *Methodischer Hinweis*

Die Variante a eignet sich zur subjektiven Beobachtung des Vorganges, während mit den Varianten b bis d das Ansteigen der Temperatur beim Erstarren der Schmelze der gesamten Klasse deutlich sichtbar gemacht werden kann.

#### *Variante a*

In ein sorgfältig gereinigtes und getrocknetes Reagenzglas füllt man etwa zu zwei Dritteln Natriumthiosulfat oder Natriumazetat und erwärmt es in einem Wasserbad.

Das Salz schmilzt in seinem Kristallwasser (Natriumthiosulfat bei 48 °C, Natriumazetat bei etwa 58 °C).

Es wird so lange erwärmt, bis die Schmelze vollkommen klar ist. Kristallrückstände an den Gefäßwänden müssen durch Umschwenken beseitigt werden.

Dann läßt man die Schmelze wieder bis auf Zimmertemperatur abkühlen. Sie ist nun stark unterkühlt.

Impft man das geschmolzene Salz durch Hineinwerfen einiger fester Körnchen der gleichen Substanz, erstarrt die Schmelze, und durch die freiwerdende Kristallisationswärme steigt die Temperatur bis auf die Schmelztemperatur an. Durch Berühren des Reagenzglases mit der Hand läßt sich die Erwärmung feststellen.

#### Variante b

Man kann den Vorgang auch mit Hilfe des Looserschen Thermoskops demonstrieren.

Das zur Kapsel des Looserschen Thermoskops gehörende Reagenzglas wird etwa zu zwei Dritteln mit Natriumthiosulfat gefüllt. Die Kristalle werden in einem Wasserbad geschmolzen. Sobald das Natriumthiosulfat flüssig ist, nimmt man das Glas aus dem Wasserbad und läßt es bis auf Zimmertemperatur abkühlen. Das Natriumthiosulfat bleibt dabei flüssig und ist somit stark unterkühlt. Man füllt etwa 2 ml Wasser in die Kapsel, schließt diese an das Thermoskop an und stellt das Reagenzglas mit der unterkühlten Schmelze in die Kapsel (Abb. 3.3.2./1). Durch

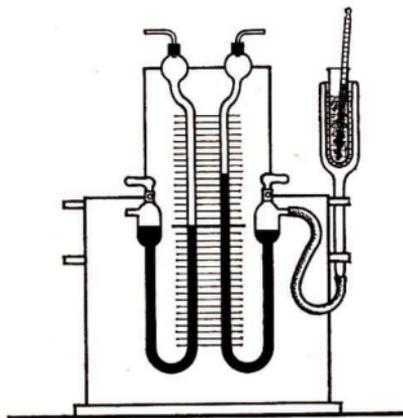


Abb. 3.3.2./1 Nachweis der Kristallisationswärme mittels eines Thermoskops

kurzzeitiges Öffnen des Glashahnes stellt man Druckausgleich her, impft die Schmelze durch einige Natriumthiosulfatkristalle und rührt mit einem Glasstab um. Das Natriumthiosulfat kristallisiert in wenigen Sekunden. Das rasche Ansteigen der Flüssigkeitssäule des Thermoskops läßt erkennen, daß bei der Kristallisation Wärmeenergie frei wird. Gleichzeitig zeigt das Thermometer, daß die Temperatur im Reagenzglas auf etwa  $47^{\circ}\text{C}$ , d. h. nahezu auf die Schmelztemperatur des Natriumthiosulfats ( $48^{\circ}\text{C}$ ), angestiegen ist. Das Wasser in der Kapsel dient zum Übertragen der Wärmeenergie vom Reagenzglas zur Kapsel.

#### Variante c

Man verfährt zunächst entsprechend Variante a. Deutlich sichtbar kann man das Ansteigen der Temperatur beim Erstarren mit einem an ein Spiegelgalvanometer angeschlossenen Thermolement zeigen, dessen Lötstelle in die Schmelze taucht (vgl. V 1.1.7.). Bei Verwendung eines Thermistors sind die in V 1.1.8. und 3.3.1. gegebenen Hinweise zu beachten.

*Variante d*

Um allen Schülern das Verfolgen des Temperaturverlaufs zu ermöglichen, eignet sich die Verwendung eines Projektionsthermometers in Verbindung mit dem Tageslichtschreibprojektor und dem Zusatzgerät für Vertikalprojektion. Man verfährt zunächst entsprechend Variante a, verwendet jedoch ein Schmelzgefäß, das der Größe des Projektionsthermometers entspricht. Nach Einsetzen des Schmelzvorganges taucht man dieses in die Schmelze.

Falls das Zusatzgerät zum Tageslichtschreibprojektor nicht zur Verfügung steht, kann man zur Projektion eine Punktlichtlampe mit Kondensator und eine Projektionslinse verwenden. Man achte darauf, daß das Thermometer so weit von der Lichtquelle entfernt ist, daß es nicht von ihrer Wärmestrahlung beeinflusst wird.

Falls nicht die gesamte Thermometerskala ausgeleuchtet werden kann, bringt man das Thermometer so an, daß mindestens der interessierende Skalenbereich projiziert wird.

*Bemerkung*

Es ist zweckmäßig, das Natriumthiosulfat schon vor der Unterrichtsstunde zu schmelzen und das Reagenzglas mit einem Wattebausch zu verschließen. Das Natriumthiosulfat bleibt bei Zimmertemperatur relativ lange Zeit flüssig.

**3.3.3. Herstellen von Kältemischungen***Zu Versuch 1*

1. Eßlöffel
2. Eis oder Schnee
3. Kochsalz oder Kalziumchlorid

*Zu Versuch 2*

- Geräte 2. und 3., außerdem
4. Becherglas (600 ml)
5. Becherglas (250 ml)
6. Watte
7. Thermometer ( $-90^{\circ}\text{C}$  bis  $30^{\circ}\text{C}$ )
8. Unterlage

*Methodischer Hinweis*

Der Versuch 1 hat den Charakter eines Freihandversuches. Man kann ihn auch als Vorversuch zu Versuch 2 einsetzen.

*Versuch 1*

Ein Eßlöffel mit Schnee oder klein zerstoßenem Eis wird auf den Experimentiertisch in einige Tropfen Wasser gelegt. Auf den Schnee schüttet man etwa einen Teelöffel Kochsalz. Nach einigen Minuten ist der Löffel am Tisch festgefroren (Abb. 3.3.3./1).

Man muß darauf achten, daß kein Salz in das unter dem Löffel befindliche Wasser gelangt, weil die Erstarrungstemperatur einer Salzlösung niedriger als die des Wassers ist und die Lösung dann nicht erstarrt.

*Versuch 2*

Aus zwei verschieden großen Bechergläsern wird ein behelfsmäßiges Kalorimeter zusammengestellt. Den Zwischenraum zwischen den Gläsern kleidet man mit Watte aus.

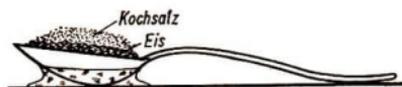


Abb. 3.3.3./1 Kältemischung auf einem Löffel

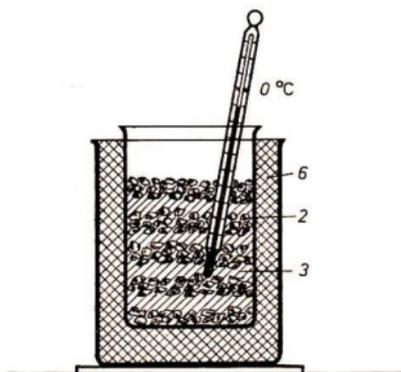


Abb. 3.3.3./2 Kältemischung in einem Kalorimeter

Man mischt fein zerkleinertes Eis oder Schnee mit Kochsalz im Verhältnis 3:1 und erzielt eine Temperaturabnahme auf etwa  $-25\text{ °C}$  (Abb. 3.3.3./2).

Eine noch bessere Kältemischung erhält man, wenn man Schnee mit Kalziumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) im Verhältnis 10:7 mischt. So kann man Temperaturen bis  $-55\text{ °C}$  erreichen. Ein Quecksilberthermometer kann dann nicht benutzt werden, da Quecksilber schon bei  $-39\text{ °C}$  erstarrt.

#### Bemerkung

Noch tiefere Temperaturen können mit Kohlendioxidschnee und Äther erzeugt werden (vgl. V 3.2.3.).

### 3.3.4. Regelation des Eises

#### Zu Variante a

1. Eisblock
2. dünner Stahldraht
3. 2 Wägestücke (5 kg)

#### Zu Variante b

4. Rohr oder Hohlzylinder mit passendem Stempel
5. zerkleinertes Eis von  $0\text{ °C}$
6. Hammer

#### Methodischer Hinweis

Der Vorgang der Regelation ist den Schülern nicht unbekannt. Sie wissen, daß sich in einem gedrückten Schneeball der Schnee zum Teil in Eis umwandelt. Das gelingt jedoch nur bei Schnee, dessen Temperatur in der Nähe des Schmelzpunktes liegt. Ohne die Regelation würden Schlittenkufen und Schlittschuhe nicht so gut gleiten. Festgetretene Fußstapfen, Schlittenspuren usw. bleiben bei „Tauwetter“ längere Zeit bestehen, weil Vereisung eingetreten ist.

#### Variante a

Man legt einen quaderförmigen Block aus Eis auf zwei Brettchen, die von zwei an Stativen befestigten Kochringen getragen werden. Um den Block legt man eine Schlinge aus dünnem Stahldraht, dessen Enden man gut miteinander verdreht. Man belastet sie, z. B. mit Wägestücken. Durch den Druck sinkt die Schmelz- bzw. Er-

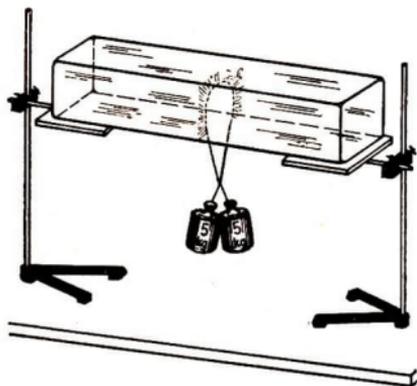


Abb. 3.3.4./1 Hindurchziehen einer Drahtschlinge durch einen Eisblock – Verwendung von Stativmaterial

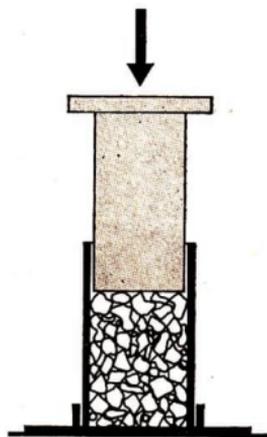


Abb. 3.3.4./2 Herstellen einer Eisstange

starrungstemperatur unter dem Draht ein wenig, so daß dort Eis flüssig wird. Das Wasser tritt unter dem Draht hervor und quillt nach oben. Dort erstarrt es sofort wieder, da es nicht mehr unter erhöhtem Druck steht; es regeliert. Die Schlinge wird so nach und nach durch den Eisblock hindurchgezogen, ohne daß der Block seinen Zusammenhalt verliert (Abb. 3.3.4./1).

#### Variante b

Man füllt das Rohr bzw. den Hohlzylinder mit zerkleinertem Eis von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Abb. 3.3.4./2). Dann wird der Stempel eingeschoben. Mit dem Hammer wird einige Male kräftig auf den Stempel geschlagen. Man nimmt einen klaren, in sich geschlossenen Zylinder aus Eis heraus.

### 3.4. Verdampfen und Kondensieren

#### 3.4.1. Erwärmen von Wasser bis zum Sieden [SE]

1. Erlenmeyerkolben (200 ml)
2. zweifach durchbohrter Stopfen
3. Winkelröhre
4. Thermometer ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
5. Stativheizplatte

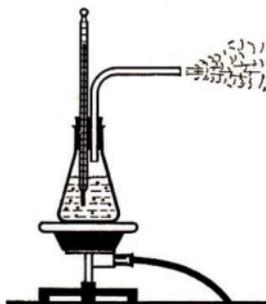


Abb. 3.4.1./1 Erwärmen von Wasser

*Methodischer Hinweis*

Dieser Versuch ist besonders geeignet, die Schüler zum genauen Beobachten zu erziehen. Die Durchführung als Schülerexperiment ist zweckmäßig, weil nur so die Erscheinungen von allen Schülern gut wahrgenommen werden können.

*Versuch*

Der Versuch wird nach Abbildung 3.4.1./1 aufgebaut. Der Erlenmeyerkolben wird mit etwa 100 ml kaltem Wasser gefüllt. Beim Erwärmen beobachtet man:

1. Beschlagen des Gefäßes von außen.  
Ursache: Kondensation von Wasserdampf aus dem Klassenraum, da die Wassertemperatur zunächst unter der Zimmertemperatur liegt.
2. Strömende Bewegung des Wassers (beobachtbar durch Schlierenbildung bzw. durch im Wasser schwebende sichtbare Teilchen).
3. Bläschenbildung (Luft) an der Gefäßwand und Aufsteigen der Bläschen zur Oberfläche (bei etwa 40 °C bis 60 °C).
4. Bildung von Wassertröpfchen (Kondenswasser) an der Gefäßinnenseite über dem Wasserspiegel.
5. Entstehen von Dampfblasen am Boden des Gefäßes bei etwa 80 °C bis 95 °C. Sie erreichen die Oberfläche nicht. Singendes Geräusch.
6. Emporsteigen von Dampfblasen zur Oberfläche bei etwa 100 °C. Das Wasser brodelte.
7. Ein Teil des unsichtbaren Wasserdampfes kondensiert einige Millimeter hinter der Röhrenmündung zu einer Wolke feiner Wassertröpfchen.

*Bemerkungen*

1. Soll der Versuch als Demonstrationsexperiment durchgeführt werden, so arbeitet man günstiger mit einem Bunsenbrenner und einem größeren Erlenmeyerkolben.
2. Bei Verwendung des Bunsenbrenners als Wärmequelle ist die Kondensation an der Gefäßinnenseite meist nicht zu beobachten, da auch die Seiten des Gefäßes stark erwärmt werden und infolgedessen die Kondensation unterbleibt.
3. Das singende Geräusch kann bei Verwendung der Heizplatte leichter wahrgenommen werden, da diese im Gegensatz zum Bunsenbrenner geräuschlos arbeitet.

**3.4.2. Bestimmen der Siedetemperatur verschiedener Flüssigkeiten**

- |   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| 1. Rundkolben oder Erlenmeyerkolben<br>(100 ml; weithalsig) | 5. Glasrohr mit ausgezogener Spitze |
| 2. Becherglas (400 ml)                                      | 6. Stativheizplatte                 |
| 3. zweifach durchbohrter Stopfen                            | 7. Vertikalmaßstab mit drei Zeigern |
| 4. Thermometer (0 °C bis 100 °C)                            | 8. Glasröhrenhalter                 |
|   | 9. Äthanol, Äther, Benzol, Azeton   |

*Methodischer Hinweis*

Wegen der Feuergefährlichkeit der verwendeten Flüssigkeiten sind die Experimente nicht als Schülerexperimente geeignet.

*Versuch*

Der Versuchsaufbau erfolgt gemäß Abbildung 3.4.2./1. Der etwa zur Hälfte mit der Versuchsflüssigkeit gefüllte Rundkolben oder Erlenmeyerkolben wird im Wasser-

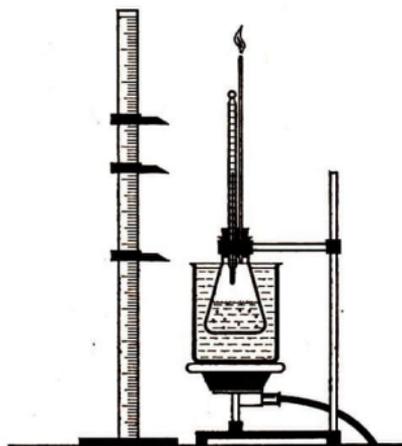


Abb. 3.4.2./1 Bestimmen der Siedetemperatur

bad erwärmt. Sobald die Versuchsflüssigkeit siedet, wird die Siedetemperatur abgelesen. Die drei Zeiger des Vertikalmaßstabes stellt man auf die Meßmarken für 0 °C, 100 °C und die Siedetemperatur, damit auch die weiter entfernt sitzenden Schüler einen optischen Eindruck vom Thermometerstand erhalten.

Der durch das Glasrohr entweichende Dampf wird entzündet, um ihn unschädlich zu machen. Nebenstehende Tabelle enthält die Siedetemperaturen der oben genannten Stoffe unter Normalbedingungen:

Stoff	Siedetemperatur in °C
Äthanol	78,3
Äther	34,6
Benzol	80,4
Azeton	56,2

#### Bemerkung

Die Temperaturanzeige ist besser sichtbar, wenn ein Projektionsthermometer (vgl. Bem. Nr. 1, V 3.3.1.) verwendet wird.

### 3.4.3. Kondensieren

#### Zu Variante a

1. Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtgewebe mit Asbest
2. Becherglas (400 ml)
3. Reagenzglas
4. Reagenzglashalter

#### Zu Variante b

- Gerät 1., außerdem
5. Erlenmeyerkolben (300 ml)
6. einfach durchbohrter Stopfen
7. gewinkelte Glasröhre
8. Glasscheibe (etwa 200 mm × 200 mm)
9. Glasschale

*Methodischer Hinweis*

Der Versuch nach Variante b kann auch als Einführungsversuch zur Destillation verwendet werden. In diesem Falle fügt man dem Wasser im Erlenmeyerkolben etwas Kochsalz als Geschmacksstoff und z. B. Eosin als Farbstoff zu. Das von der Glasscheibe tropfende Wasser ist geschmacksfrei und farblos.

*Variante a: Kondensation am kalten Reagenzglas*

Man bringt in einem Becherglas Wasser zum Sieden und hält ein mit kaltem Wasser gefülltes Reagenzglas in den entweichenden Dampf. Der Dampf kondensiert an der kalten Wand des Reagenzglases; sie überzieht sich mit einer Wasserschicht, die nach unten hin zu großen Tropfen zusammenläuft (Abb. 3.4.3./1).

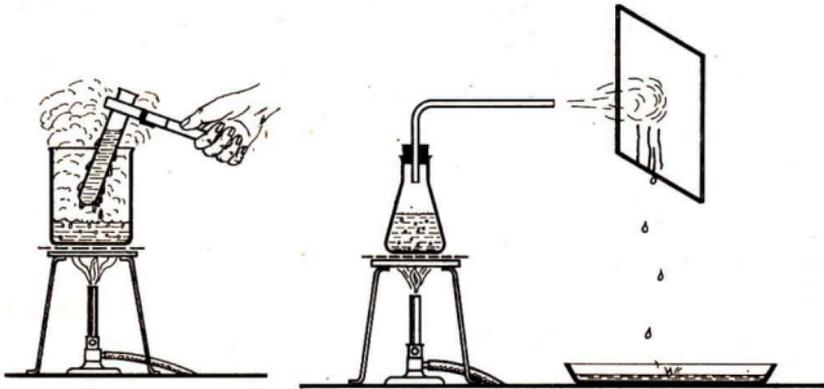


Abb. 3.4.3./1 Kondensation am kalten Reagenzglas

Abb. 3.4.3./2 Kondensation an einer Glasscheibe

*Variante b: Kondensation an einer Glasscheibe*

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3.4.3./2. Im Erlenmeyerkolben wird Wasser zum Sieden gebracht. Der aus der Glasröhre austretende Dampf kondensiert an der Glasscheibe; das Kondenswasser läuft von der Scheibe ab und tropft in die daruntergestellte Schale.

**3.4.4. Destillieren***Zu Variante a*

1. Erlenmeyerkolben
2. 2 gewinkelte Glasrohre
3. einfach durchbohrter Stopfen
4. Glasschale
5. Rundkolben
6. Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtgewebe mit Asbest
7. Wasserleitungsschlauch
8. Eosin, Kochsalz

Zu Variante b

Geräte 1. bis 8., außerdem

9. Kühler

10. einfach durchbohrter Stopfen

*Methodischer Hinweis*

Als Vorversuch zu diesen Experimenten ist Versuch 3.4.3., Variante b, geeignet. In einer Gegenüberstellung kann gezeigt werden, daß durch die Verbesserung der Versuchsanordnung die Ausbeute an Destillat erheblich gesteigert werden kann.

*Variante a: Einfache Destillationsanlage*

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3.4.4./1. Das Wasser im Erlenmeyerkolben wird mit Eosin gefärbt und mit etwas Kochsalz auch geschmacklich gekennzeichnet.

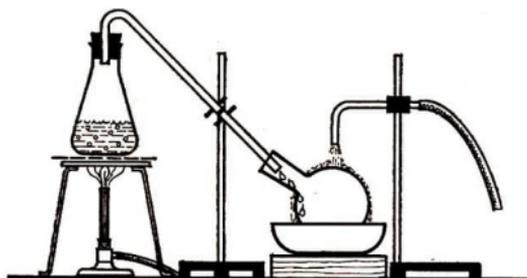


Abb. 3.4.4./1 Einfache Destillationsanlage

Solange die Lösung siedet, strömt der Wasserdampf durch das Glasrohr in den mit kaltem Wasser gekühlten Rundkolben und kondensiert. Das kondensierte Wasser ist farblos und schmeckt nicht nach Kochsalz. Daraus kann man schließen, daß beim Destillieren nur das Lösungsmittel und nicht der gelöste Stoff verdampft.

*Variante b: Destillationskühler für Wasser*

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3.4.4./2. Dem Wasser im Erlenmeyerkolben fügt man etwas Eosin und Kochsalz zu.

Von den beiden seitlichen Rohrstopfen des Kühlers ist der untere mit der Wasserleitung verbunden; aus dem oberen fließt das Wasser durch einen Schlauch in eine

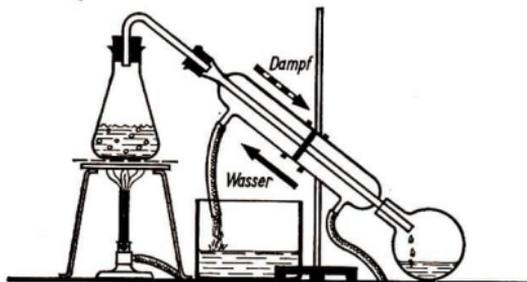


Abb. 3.4.4./2 Destillationskühler für Wasser

daruntergestellte Wanne oder in den Ausguß ab. Siedet das Wasser im Erlenmeyerkolben, so entweicht der Dampf durch die Röhre in den Kühler, wo er an der kalten Wandung kondensiert. Das entstehende Kondenswasser ist völlig rein.

#### Bemerkung

Zum Färben des Wassers eignen sich auch Kaliumpermanganat und rote Tinte. Nicht verwenden sollte man Kupfersulfat, wenn eine Geschmacksprobe des Kondensats vorgenommen wird, da bei heftigem Sieden Spuren des giftigen Kupfersulfats mit in das Kondensat gerissen werden können. Ungeeignet zum Färben ist blaue Füllhaltertinte, da sie sich beim Erhitzen entfärbt.

### 3.4.5. Modellexperiment zum Wärmeaustauscher

- |  |  |
|--|--|
| 1. Erlenmeyerkolben (500 ml)           | 9. Glasverbindungshahn                                   |
| 2. 2 zweifach durchbohrte Gummistopfen | 10. Glasröhrenhalter                                     |
| 3. Schlangenkühler                     | 11. Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtgewebe mit Asbest |
| 4. einfach durchbohrter Stopfen        | 12. 4 Schlauchstücke (etwa 50 mm lang)                   |
| 5. zweimal gewinkeltes Glasrohr        | 13. Wasserleitungsschlauch                               |
| 6. 3 einmal gewinkelte Glasrohre       | 14. Unterstellkasten oder Stelltisch                     |
| 7. 2 Thermometer (0 °C bis 100 °C)     | 15. Erlenmeyerkolben                                     |
| 8. Becherglas (800 ml)                 | 16. Glasrohr   |

#### Methodischer Hinweis

Dieses Experiment kann eingesetzt werden

- bei der Behandlung des Wärmeaustausches als Modell für die technische Anwendung,
- zur Erläuterung der prinzipiellen Arbeitsweise des Kühlsystems in einem Kernreaktor.

#### Versuch

Die Versuchsanordnung wird entsprechend Abbildung 3.4.5./1 zusammengestellt. Die Wasserleitung wird zunächst so an den Kühler angeschlossen, daß das Wasser

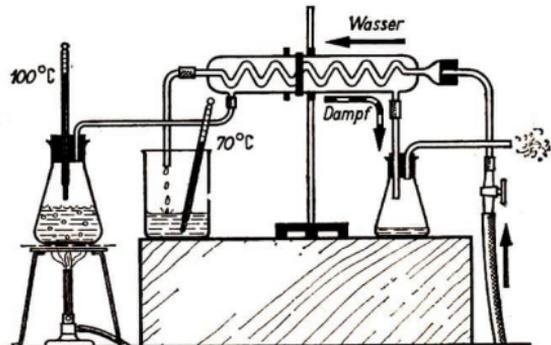


Abb. 3.4.5./1 Modell eines Wärmeaustauschers

entgegen der Dampfrichtung strömt. Das Wasser im Erlenmeyerkolben wird bis zum Sieden erwärmt. Der Dampf strömt durch den Kühler und passiert danach den als Tropfenfänger dienenden kleinen Erlenmeyerkolben. Man öffnet die Wasserleitung und stellt den Wasserstrom so ein, daß das Wasser eine Temperatur von etwa 70 °C erreicht. Durch Vertauschen der Ein- und Austrittsstelle des Wassers untereinander kann man erreichen, daß das Wasser in gleicher Richtung wie der Dampf durch den Kühler fließt. Der Wärmeaustausch wird dadurch beeinträchtigt, die Temperatur des ausfließenden Wassers ist nicht mehr so hoch.

### 3.4.6. Verdunsten

- |                             |                                 |
|-----------------------------|---------------------------------|
| 1. 2 Bechergläser (1000 ml) | 8. Reagenzglas                  |
| 2. 3 Uhrgläser (Ø 75 mm)    | 9. Tropfpipette mit Gummisauger |
| 3. Präzisionswaage          | 10. Holztafel mit Fuß           |
| 4. Wägesatz                 | 11. Äther, Spiritus             |
| 5. Luftstromerzeuger        | 12. Glasplatte                  |
| 6. Wärmestrahler            | 13. Filterpapier                |
| 7. Stativheizplatte         |                                 |

*Versuch 1: Abhängigkeit der Geschwindigkeit  
des Verdunstens von der Art der Flüssigkeit*

#### *Variante a*

Aus Filterpapier schneidet man 3 Streifen und tränkt den einen mit 1 ml Wasser, den zweiten mit 1 ml Alkohol, den dritten mit 1 ml Äther. Man bringt sie feucht an eine auf dem Tisch stehende Glasscheibe. Sobald die Streifen getrocknet sind, fallen sie ab, und zwar in der Reihenfolge Äther, Alkohol, Wasser. Die Geschwindigkeit des Verdunstens ist von der Art der Flüssigkeit abhängig (Abb. 3.4.6./1 a).

#### *Variante b*

Auf die Waagschalen einer austarierten Waage legt man gleiche Uhrgläser. Auf das eine gibt man einige Milliliter Wasser, auf das andere Äther, wobei das Uhrglas mit dem Äther so weit gefüllt wird, daß sich der Waagebalken gerade nach dieser Seite neigt. Nach kurzer Zeit ist so viel Äther verdunstet, daß sich der Waagebalken zur anderen Seite neigt.

#### *Variante c*

Auf den Tageslichtschreibprojektor stellt man drei kleine Uhrgläser und füllt sie mit Wasser, Spiritus und Äther. In der Projektion sind die drei so hergestellten Flüssigkeitslinsen gut zu erkennen. Durch die Erwärmung verdunsten Äther und Spiritus relativ schnell, während die Wasserlinse noch lange Zeit erhalten bleibt.

*Versuch 2: Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Verdunstens von der Temperatur*

#### *Variante a*

Man befeuchtet zwei gleich große Streifen aus Filterpapier, die auf zwei Uhrgläsern liegen, mit der gleichen Menge Äther. Man stellt das eine Uhrglas in den Schatten einer Holztafel, das andere in die Sonne oder läßt es durch eine Glühlampe bestrahlen. Das Verdunsten ist auf diesem Glas rascher beendet als auf dem kühlen (Abb. 3.4.6./1b).

*Variante b*

Zwei gleiche Streifen aus Filterpapier werden mit gleichen Mengen Spiritus oder Wasser getränkt und an eine senkrechte Glasscheibe gedrückt. Ein Streifen wird mit einem Wärmestrahler bestrahlt, er fällt zuerst getrocknet ab.

*Variante c*

Auf die Schalen einer austarierten Waage gießt man gleiche Mengen Äther oder Spiritus. Eine Schale wird mit einem Wärmestrahler bestrahlt. Der Waagebalken neigt sich nach der anderen Seite.

*Variante d*

Zwei Uhrgläser werden mit gleichen Wassermengen gefüllt. Ein Uhrglas stellt man auf eine mäßig vorgewärmte Stativheizplatte. Das in ihm befindliche Wasser verdunstet schneller.

*Versuch 3: Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Verdunstens von der Oberfläche**Variante a*

Man schüttet 1 ml Äther in ein Reagenzglas und schüttet die gleiche Menge auf ein mit Filterpapier bedecktes Uhrglas. Auf diesem erfolgt das Verdunsten schneller, da die Oberfläche größer ist (Abb. 3.4.6./1 c).

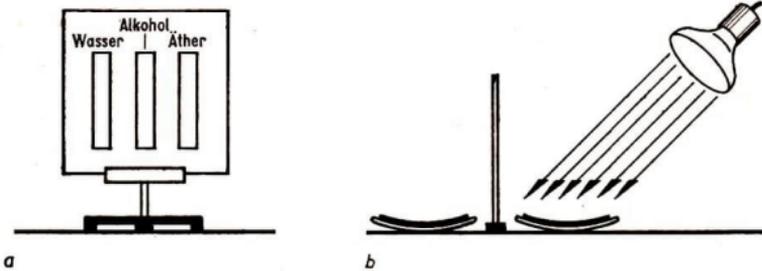
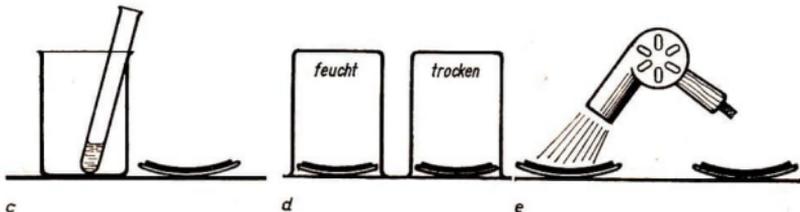


Abb. 3.4.6./1 Abhängigkeit der Geschwindigkeit der Verdunstung

- von der Art der Flüssigkeit
- von der Temperatur
- von der Oberfläche
- vom Sättigungsgrad der Luft
- von der Luftbewegung



*Variante b*

Auf eine Waagschale der Präzisionswaage legt man geknülltes Filterpapier und tariert die Waage mit Wägestücken aus. Auf die andere Waagschale und auf das Filterpapier werden gleiche Mengen Äther getropft. Der Äther verdunstet vom Filterpapier schneller, da er dort eine größere Oberfläche einnimmt.

*Versuch 4: Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Verdunstens vom Sättigungsgrad der Luft*

Mit einer Tropfpipette tropft man gleiche Mengen Wasser auf zwei Uhrgläser, auf denen zwei gleich große Filterpapierscheiben liegen. Über die Uhrgläser stellt man umgekehrt zwei gleich große Bechergläser, von denen man das eine im Innern stark anfeuchtet. Man läßt sie längere Zeit an einer warmen Stelle stehen; die Flüssigkeit im trockenen Glas verdunstet zuerst (Abb. 3.4.6./1d).

*Versuch 5: Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Verdunstens von der Luftbewegung*

Zwei gleich große Scheiben aus Filterpapier liegen in einiger Entfernung voneinander auf zwei Uhrgläsern und werden mit den gleichen Mengen Alkohol befeuchtet. Man erregt durch einen kalt blasenden Luftstromerzeuger oder durch Fächeln einen Luftstrom, der über das eine Uhrglas hinwegstreicht. Das auf diesem Uhrglas liegende Filterpapier trocknet schneller (Abb. 3.4.6./1e).

Zur Projektion können die Uhrgläser auf den Tageslichtschreibprojektor gestellt werden. Dann stellt man eine Trennwand zwischen die beiden Uhrgläser und läßt das Filterpapier weg.

### 3.4.7. Wärmeaufnahme beim Verdunsten

*Zu Variante a*

1. Reagenzglas ( $\varnothing$  18 mm)
2. zweifach durchbohrter Stopfen
3. gewinkeltes Glasrohr
4. gerades Glasrohr
5. Becherglas (800 ml)
6. Gasschlauch
7. Papier

*Zu Variante b*

8. Uhrglas ( $\varnothing$  45 mm)
9. Holzunterlage
10. Luftstromerzeuger

*Zu Variante c*

11. Thermometer (0 °C bis 100 °C) oder Schauthermometer
12. Watte

*Zu Variante d*

13. Kryophor
14. Becherglas (1000 ml)
15. Kältemischung

## Zu Variante e

16. Erlenmeyerkolben (300 ml)
17. einfach durchbohrter Stopfen
18. U-Rohr-Manometer

*Methodische Hinweise*

1. Für die Demonstration der Wärmeaufnahme beim Verdunsten sind viele Flüssigkeiten geeignet. Bei den hier dargestellten Versuchen wird Äther verwendet, da er eine niedrige Siedetemperatur hat und deshalb schnell verdunstet, wodurch ein starker Abkühlungseffekt auftritt. Äther ist auch im Gegensatz zu vielen anderen geeigneten Flüssigkeiten in niedriger Konzentration nicht gesundheitsschädigend.
2. Bereits beim Verdunsten einiger Tropfen Äther auf dem Handrücken ist deutlich die Abkühlung zu spüren. Dieser Effekt kann durch leichtes Darüberblasen noch verstärkt werden. Neben diesem subjektiven Nachweis der Aufnahme von Wärmeenergie sollten im Unterricht auch noch einige der im folgenden beschriebenen objektiven Varianten durchgeführt werden.

*Variante a: Eisbildung beim Verdunsten von Äther*

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3.4.7./1. Das Reagenzglas füllt man bis etwa ein Sechstel des Fassungsvermögens mit Wasser und schichtet ebensoviel Äther darüber. Das gewinkelte Glasrohr verbindet man mit der Stadtgasleitung und leitet Gas durch das Reagenzglas. Aus Sicherheitsgründen entzündet man das aus dem geraden Rohr austretende Gas, nachdem alle Luft aus dem Reagenzglas verdrängt ist. Durch Verdunsten kühlt sich der Äther so stark ab, daß schließlich das Wasser zu einem Eisbrei erstarrt. Der Versuch gelingt nur dann, wenn der Äther ganz rein ist.

Wird das Reagenzglas frei aufgestellt, so überzieht es sich im unteren Teil mit einer Reifschicht.

*Variante b: Festfrieren eines Uhrglases infolge Ätherverdampfung*

Man bringt auf eine Holzunterlage einige Wassertropfen und stellt ein Uhrglas darauf. Auf dieses gießt man etwas Äther und richtet den Luftstrahl eines kalt blasenden Luftstromerzeugers darauf (Abb. 3.4.7./2). Infolge des schnellen Verdunstens des Äthers ist die Abkühlung so stark, daß das Uhrglas an der Unterlage festfriert.

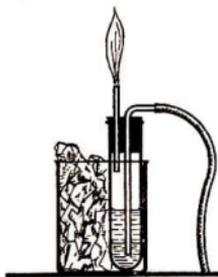


Abb. 3.4.7./2 Festfrieren eines Uhrglases durch Verdunsten von Äther

Abb. 3.4.7./1 Eisbildung beim Verdunsten von Äther

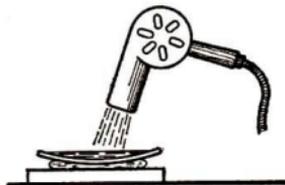




Abb. 3.4.7./3 Thermometer mit Wattebausch

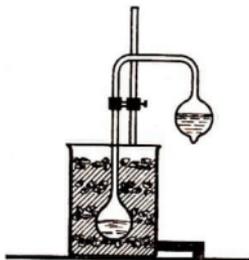


Abb. 3.4.7./4 Kryophor in einer Kältemischung

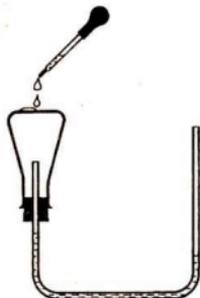


Abb. 3.4.7./5 Nachweis der Abkühlung beim Verdunsten mit einem Thermoskop

*Variante c: Abkühlung eines äthergetränkten Wattebausches*

Man umwickelt die Kugel eines Thermometers mit einem Wattebausch und bindet ihn mit einem Zwirnsfaden fest. Darauf tropft man etwas Äther; die Temperatur sinkt sofort. Schwenkt man das Thermometer durch die Luft oder richtet den Luftstrom eines kalt blasenden Luftstromerzeugers gegen den Wattebausch, so sinkt die Temperatur in kurzer Zeit noch weiter ab (Abb. 3.4.7./3).

*Variante d: Abkühlung durch Verdunsten im Kryophor*

Ein Kryophor wird so weit geneigt, daß der größere Teil des Wassers in die obere Kugel fließt. Dann richtet man den Kryophor wieder auf, steckt den langen Schenkel in ein Becherglas mit einer Kältemischung und klemmt ihn an einem Stativ fest. In dieser Stellung läßt man den Kryophor stehen. Der Wasserdampf wird in der kalten, unteren Kugel niedergeschlagen, so daß Wasser in der oberen Kugel dauernd verdunstet. Nach etwa einer Viertelstunde hat sich das Wasser in der oberen Kugel mit einer Eisschicht überzogen (Abb. 3.4.7./4).

*Variante e: Nachweis der Abkühlung mit einem Thermoskop*

Nach Abbildung 3.4.7./5 wird aus einem Erlenmeyerkolben und einem U-Rohr-Manometer ein Thermoskop hergestellt. Die Manometerflüssigkeit steht zunächst in beiden Schenkeln gleich hoch. Gießt man etwas Äther auf den Erlenmeyerkolben, so sinkt der Druck im Gefäß infolge der Abkühlung, und die Manometerflüssigkeit verschiebt sich.

### 3.4.8. Spezifische Verdampfungswärme von Wasser

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Präzisionswaage                         | 7. Rührer                    |
| 2. Wägesatz                                | 8. 3 Unterlegebrettchen      |
| 3. 2 Bechergläser (1000 ml)                | oder Schaumpolystyrolplatten |
| 4. Becherglas (2000 ml)                    |                              |
| 5. 2 Tauchsieder gleicher Leistung (300 W) |                              |
| 6. Thermometer (0 °C bis 100 °C)           |                              |

### Methodische Hinweise

1. Dieses Experiment ermöglicht die Bestimmung der spezifischen Verdampfungswärme von Wasser mit einem geringen gerätetechnischen, zeitlichen und rechnerischen Aufwand bei einer für schulische Zwecke hinreichenden Genauigkeit.
2. Vor dem Experiment sollte durch eine Stromstärkemessung festgestellt werden, ob die beiden verwendeten Tauchsieder etwa die gleiche Leistung haben.

### Versuch

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3.4.8./1. Die Bechergläser stehen zur Wärmedämmung auf Holz oder Schaumpolystyrol. Das Becherglas II, in dem Wasser verdampft wird, stellt man zur zusätzlichen Wärmedämmung in ein etwas größeres Becherglas. Die Bechergläser I und II werden mit je 500 g Wasser gefüllt und die Tauchsieder so mit Stativmaterial befestigt, daß sie den Boden der Bechergläser nicht berühren. Die Waage wird grob austariert. In das Becherglas auf der Waagschale (Becherglas II) gießt man zusätzlich einige Gramm Wasser und schaltet den zugehörigen Tauchsieder ein. Das Wasser erwärmt sich und beginnt zu sieden.

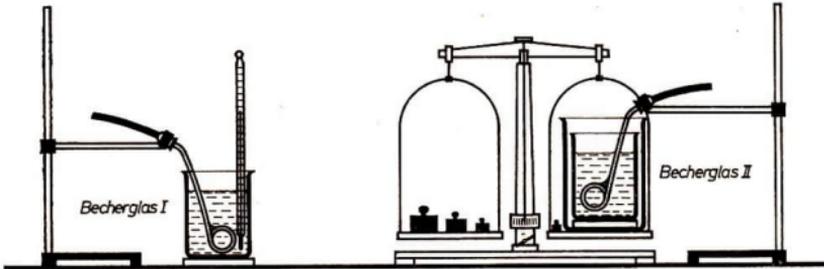


Abb. 3.4.8./1 Bestimmen der spezifischen Verdampfungswärme von Wasser

Sobald die Waage wieder im Gleichgewicht ist (Verlust von Wasser infolge der Verdampfung), wird auch der andere Tauchsieder eingeschaltet und die Temperatur  $\vartheta_1$  des kalten Wassers im Becherglas I gemessen. Auf die Waagschale neben das Becherglas II werden Wägestücke mit einer Masse von insgesamt  $m_2 = 30$  g gelegt. Sind von diesem Zeitpunkt an 30 g Wasser verdampft, so befindet sich die Waage erneut im Gleichgewicht. In diesem Moment werden beide Tauchsieder ausgeschaltet. Das Wasser im Becherglas I wird umgerührt, und sobald seine Temperatur  $\vartheta_2$  nicht mehr steigt, wird sie notiert.

Bei Vernachlässigung der Wärmekapazität des Becherglases und der Abgabe von Wärmeenergie an die Umgebung erhält man aus dem Temperaturanstieg  $\vartheta_2 - \vartheta_1$ , aus der spezifischen Wärmekapazität  $c$  des Wassers und aus der Masse  $m_1$  des erwärmten Wassers die vom Tauchsieder I abgegebene Wärmeenergie:

$$W_w = c \cdot m_1 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1).$$

Unter der Annahme, daß der andere Tauchsieder in der gleichen Zeit die gleiche Wärmeenergie abgegeben hat und keine Abgabe von Wärmeenergie vom Becherglas II an die Umgebung erfolgte, erhält man die spezifische Verdampfungswärme

$q_v$  von Wasser als Quotient aus der zur Verdampfung benötigten Wärmeenergie  $W_w$  und der Masse  $m_2$  des verdampften Wassers:

$$q_v = \frac{c \cdot m_1 \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)}{m_2} = \frac{c \cdot m_1 \cdot \Delta\vartheta}{m_2}$$

*Beispiel*

*Gegeben:*

$$\begin{aligned} m_2 &= 30 \text{ g (verdampftes H}_2\text{O)} \\ m_1 &= 500 \text{ g (H}_2\text{O im Becherglas I)} \\ \Delta\vartheta &= 32,5 \text{ K} \end{aligned}$$

$$c = 4,18 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

*Gesucht:*

$q_v$

*Lösung:*

$$q_v = \frac{c \cdot m_1 \cdot \Delta\vartheta}{m_2}$$

$$q_v = \frac{4,18 \cdot 10^3 \cdot \text{J} \cdot 500 \text{ g} \cdot 32,5 \text{ K}}{\text{kg} \cdot \text{K} \cdot 30 \text{ g}}$$

$$q_v \approx 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

*Bemerkungen*

1. Stehen zwei gleiche Tauchsieder nicht zur Verfügung, so kann das Experiment auch mit einem Tauchsieder durchgeführt werden. Dabei wird zunächst eine bestimmte Wassermenge verdampft und danach in der gleichen Zeit eine bestimmte Wassermenge erwärmt, um die vom Tauchsieder in dieser Zeit abgegebene Wärmeenergie zu ermitteln. In diesem Falle sind Netzspannungsschwankungen als Fehlerquelle mit in Betracht zu ziehen.
2. Werden Tauchsieder mit einer Leistung von 1000 W verwendet, so erhöht man die Masse  $m_1$  auf 1000 g,  $m_2$  auf 50 g und verwendet Bechergläser mit einem Volumen von 2 Litern.
3. Die Masse des Wassers im Becherglas II kann beliebig gewählt werden, da sie nicht in die Rechnung eingeht. Wichtig ist, daß der Tauchsieder hinreichend eingetaucht ist.
4. Die Befestigung des Tauchsieders im Becherglas II muß so erfolgen, daß kein Kondenswasser vom Stativmaterial auf die Waagschale oder in das Becherglas tropfen kann, weil sonst beträchtliche Meßfehler auftreten.

### 3.4.9. Spezifische Kondensationswärme von Wasser

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1. 2 Erlenmeyerkolben (300 ml)     | 8. zweifach gebogene Glasröhre mit Spitze |
| 2. einfach durchbohrter Stopfen    | 9. Kalorimeter                            |
| 3. einfach gebogene Glasröhre      | 10. Stativheizplatte                      |
| 4. Verbindungsschlauch             | 11. 2 Wärmeschutzschirme                  |
| 5. 2 Thermometer (0 °C bis 100 °C) | 12. Unterlegklotz                         |
| 6. dreifach durchbohrter Stopfen   | 13. Präzisionswaage                       |
| 7. gerade Glasröhre                | 14. Wägesatz                              |

*Versuch*

Der Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3.4.9./1. Auf der Stativheizplatte wird Wasser im Erlenmeyerkolben zum Sieden gebracht. Der zweite Erlenmeyerkolben dient als Tropfenfänger. Der Dampf wird im wassergefüllten Kalorimeter kondensiert. Die drei Gefäße sind durch Wärmeschutzschirme voneinander getrennt.

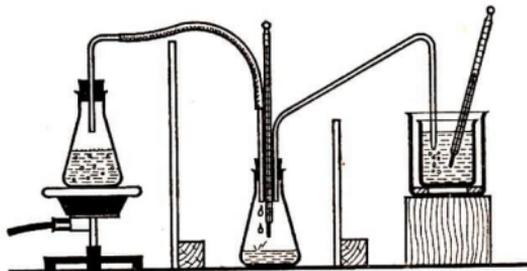


Abb. 3.4.9./1 Kalorimetrische Bestimmung der spezifischen Kondensationswärme von Wasser

Im weiteren werden folgende Symbole verwendet:

- $m_0$  — Masse des Kalorimeters
- $m_1$  — Masse des wassergefüllten Kalorimeters zu Beginn
- $m_2$  — Masse des wassergefüllten Kalorimeters am Ende
- $m_3$  — Masse des kalten Wassers;  $m_3 = m_1 - m_0$
- $m_4$  — Masse des Kondenswassers;  $m_4 = m_2 - m_1$
- $\vartheta_1$  — Temperatur des kalten Wassers
- $\vartheta_2$  — Temperatur des erwärmten Wassers
- $\vartheta_D$  — Temperatur des Dampfes
- $q_k$  — spezifische Kondensationswärme des Wassers
- $C$  — Wärmekapazität des Kalorimeters
- $c$  — spezifische Wärmekapazität von Wasser

Das Kalorimeter wird leer gewogen ( $m_0$ ), mit kaltem Wasser ( $\vartheta_1$ ) gefüllt und erneut gewogen ( $m_1$ ).

Sobald der Dampf ohne jede Spur von Feuchtigkeit aus der Spitze entweicht, senkt man diese schnell in die Kalorimeterflüssigkeit. Die sofort einsetzende Kondensation des Dampfes wird von einem lauten Knacken begleitet.

Die Temperatur des Dampfes wird durch das Thermometer im Tropfenfänger ermittelt ( $\vartheta_D$ ). Sobald die Temperatur im Kalorimeter um etwa 50 K gestiegen ist, unterbricht man die Kondensation, indem man den Erlenmeyerkolben rasch anhebt und das Kalorimeter schnell fortnimmt. Man liest sofort die erreichte Temperatur ab und ermittelt die Masse  $m_2$  des Kalorimeters mit Inhalt.

Die vom Dampf beim Kondensieren und die vom Kondenswasser beim Abkühlen abgegebene Wärmeenergie ist:

$$W_{w_1} = m_4 \cdot q_k + m_4 \cdot c \cdot (\vartheta_D - \vartheta_2).$$

Die vom kalten Wasser und dem Kalorimeter aufgenommene Wärmeenergie ist:

$$W_{w_2} = (m_3 \cdot c + C) \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1).$$

Tritt keine Wärmeübertragung an die Umgebung auf, so kann man gleichsetzen:

$$m_4 \cdot q_k + m_4 \cdot c \cdot (\vartheta_D - \vartheta_2) = (m_3 \cdot c + C) \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1).$$

Daraus erhält man für die spezifische Kondensationswärme des Wassers:

$$q_k = \frac{(m_3 \cdot c + C) \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) - m_4 \cdot c \cdot (\vartheta_D - \vartheta_2)}{m_4}.$$

*Bemerkung*

Steht kein Kalorimeter zur Verfügung, so kann man zwei ineinandergestellte Bechergläser verwenden. Die Wärmekapazität dieses Behelfskalorimeters läßt sich rechnerisch näherungsweise als Produkt aus der Masse des inneren Becherglases und der spezifischen Wärmekapazität der entsprechenden Glassorte bestimmen (vgl. V 1.3.7.).

**3.4.10. Temperaturverlauf beim Erwärmen des Wassers bis zum Sieden [SE]**

1. Becherglas (250 ml)
2. Stativheizplatte
3. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
4. Rührer

*Methodische Hinweise*

1. Dieses Experiment kann vorteilhaft als Schülerexperiment in gleicher Front durchgeführt werden.
2. Arbeiten die Schüler in Dreiergruppen, so sollten gleichzeitig die Beobachtungen von Versuch 3.4.1. vorgenommen werden.
3. Damit die Kurve von Anfang an linear verläuft, muß die Heizplatte vorgewärmt werden und die Messung der Temperatur etwa eine Minute nach dem Aufsetzen des Becherglases beginnen.
4. Es kann angenommen werden, daß die Heizplatte in gleichen Zeiten die gleiche Wärmeenergie an das Becherglas abgibt. Dann entspricht der Verlauf der Funktion  $\vartheta = f(t)$  dem Verlauf der Funktion  $\vartheta = f(W_w)$ .

*Versuch*

Man füllt das Becherglas mit etwa 200 ml Wasser und erwärmt das Wasser auf der Stativheizplatte bis zum Sieden (Abb. 3.4.10./1). Während des Erwärmens liest man in Abständen von einer halben oder einer ganzen Minute bei ständigem Um-

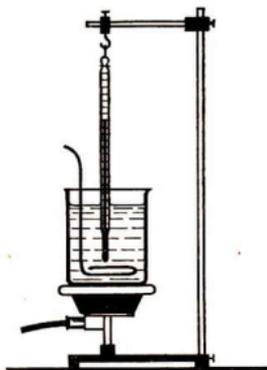


Abb. 3.4.10./1 Erwärmen von Wasser



Abb. 3.4.10./2 Temperatur-Zeit-Diagramm

rühren die Temperatur ab. Die abgelesenen Werte werden in eine Tabelle eingetragen und in einem Diagramm dargestellt (Abb. 3.4.10./2). Aus dem Verlauf der Kurve bis etwa 80 °C erkennt man, daß die Temperaturänderung der zugeführten Wärmeenergie proportional ist. Der dann geringer werdende Anstieg der Kurve weist darauf hin, daß bei höheren Temperaturen die zugeführte Wärmeenergie zunehmend zum Verdampfen des Wassers benötigt wird (außerdem verkleinert sich die übertragene Wärmeleistung), bis schließlich nach dem Erreichen der Siedetemperatur die gesamte zugeführte Wärmeenergie zum Verdampfen benötigt wird; die Kurve steigt nicht weiter an.

### Beispiel

Stativheizplatte 150 W, 3 min vorgewärmt

200 ml Wasser

Beginn der Messungen 2 min nach Aufsetzen des Becherglases

Zeit $t$ in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Temperatur $\vartheta$ in °C	24,0	30,0	36,5	42,5	48,5	54,0	60,0	66,0	72,0

Zeit $t$ in min	9	10	11	12	13	14	15	16
Temperatur $\vartheta$ in °C	78,0	83,0	87,5	91,5	94,5	97,5	100,0	100,0

### Bemerkung

Bei der Durchführung als Demonstrationsexperiment arbeitet man günstiger mit einem Bunsenbrenner, einer größeren Wassermenge und einem Schauthermometer.



## 3.4.11. Sieden unter vermindertem Druck

### Zu Variante a

1. Bunsenbrenner
2. Rundkolben (1000 ml)
3. einfach durchbohrter Stopfen
4. Becherglas (800 ml)
5. Einweghahn
6. pneumatische Wanne

### Zu Variante b

- Geräte 1. bis 3., außerdem
7. Dreiweghahn
8. Gummischlauch
9. Kolbenprober (100 ml)
10. Glasröhrenhalter

### Zu Variante c

Geräte 1. und 4., außerdem

11. Kolbenluftpumpe mit Teller und Rezipient
12. Dreifuß
13. Drahtgewebe mit Asbest
14. Thermometer (0 °C bis 100 °C)

*Methodischer Hinweis*

Obwohl alle drei Varianten die gleiche physikalische Erscheinung — Herabsetzung der Siedetemperatur bei Verminderung des Druckes — zeigen, weisen sie auch wesentliche Besonderheiten auf:

Variante a bewirkt einen gewissen Überraschungseffekt, denn das Wasser kommt zum Sieden, obwohl der Kolben mit kaltem Wasser übergossen wird.

Bei Variante b können die Schüler infolge des einfachen Versuchsaufbaus besonders leicht auf die durch das Herausziehen des Kolbens bewirkte Druckverminderung schließen. Außerdem läßt sich die Druckänderung oft und schnell wiederholen, wodurch der Effekt des Aufwallens sehr oft gezeigt werden kann.

Bei Variante c gelingt es, Wasser mit einer sehr niedrigen Temperatur zum Sieden zu bringen, insbesondere, wenn mit einer Motor-Vakuumpumpe gearbeitet wird.

*Variante a: Sieden unter vermindertem Druck durch Abkühlung des Gefäßes*

Ein halbvoll mit Wasser gefüllter Rundkolben wird durch einen Gummistopfen verschlossen, in dem ein geöffneter Glashahn steckt. Der Kolben wird an einem Stativ so befestigt, daß er von der Gasflamme eines Bunsenbrenners unmittelbar getroffen wird (Abb. 3.4.11./1 a). Sobald das Wasser siedet, wird die Zufuhr von Wärmeenergie unterbrochen und der Hahn geschlossen.

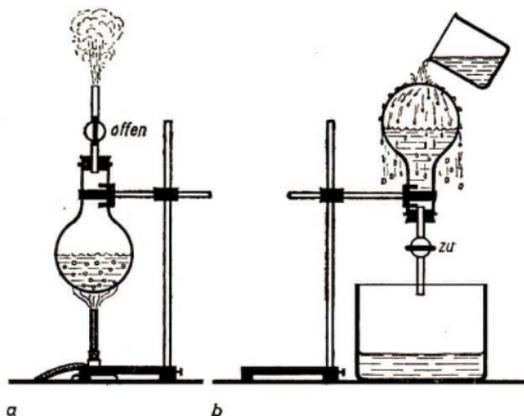


Abb. 3.4.11./1 Sieden von Wasser durch Druckerniedrigung

Man dreht den Kolben, so daß der Hals nach unten zeigt, und stellt einen Glastrog darunter. In dieser Stellung läßt man den Kolben stehen; das in ihm befindliche Wasser und der Dampf kühlen sich allmählich ab.

Der Dampf kondensiert dabei; es kommt zu einem Unterdruck im Innern des Kolbens. Infolgedessen siedet das Wasser wieder. Man kann dies dadurch begünstigen, daß man kaltes Wasser über den Kolben fließen läßt. Dies bewirkt ein Vermindern des Druckes und ein erneutes Einsetzen des Siedens (Abb. 3.4.11./1 b).

*Variante b: Sieden durch Druckverminderung mittels Kolbenprober*

Ein fast vollständig mit Wasser gefüllter Kolben wird mit Gummistopfen und Dreiweghahn verschlossen. Nach Abbildung 3.4.11./2 wird ein großer Kolbenprober

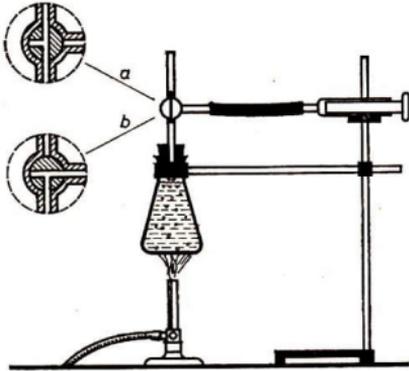


Abb. 3.4.11./2 Sieden bei Druckerniedrigung mittels Kolbenprober

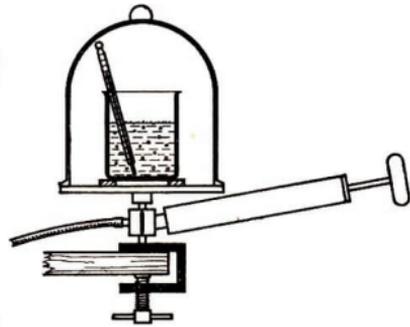


Abb. 3.4.11./3 Druckerniedrigung durch Luftpumpe

durch einen Gummischlauch mit dem Dreiweghahn verbunden und mit einem Glasröhrenhalter am Stativ befestigt. Der Hahn befindet sich zunächst in Stellung a, der Kolben ist hineingeschoben.

Das Wasser wird erwärmt, und sobald es siedet, wird die Wärmequelle entfernt, worauf das Sieden aufhört. Der Hahn wird in Stellung b gedreht. Zieht man nun den Kolben heraus, so sinkt der Druck im Kolben. Das Wasser beginnt erneut zu siedend, obwohl seine Temperatur abgesunken ist. Durch Hineindrücken und Herausziehen des Kolbens im Kolbenprober läßt sich das Aufwallen des Wassers mehrmals zeigen.

#### *Variante c: Sieden durch Druckverminderung mittels Luftpumpe*

Im einem Becherglas wird Wasser auf etwa 80 °C erwärmt. Stellt man es dann unter den Rezipienten der Luftpumpe und evakuiert, so beginnt das Wasser zu siedend (Abb. 3.4.11./3). Durch die Anzeige des im Wasser befindlichen Thermometers erkennen die Schüler, daß Wasser bereits bei Temperaturen weit unter 100 °C siedend kann.

#### *Bemerkungen*

1. Kühlt man den Kolben in Variante a zu stark ab, so kann er infolge der starken Druckverminderung zerstört werden, es kommt zu einer Implosion. Diese ruft einen heftigen Knall hervor und ist nicht ungefährlich, wenn auch die Glassplitter nicht weit fortgeschleudert, sondern im wesentlichen nach innen gesaugt werden. Wegen der Implosionsgefahr sind Gläser mit ebenen Böden für den Versuch nicht geeignet. Zum Schutz der Schüler ist eine Glasscheibe aufzustellen. Der Lehrer sollte eine Schutzbrille tragen.
2. Bei Variante b sollte beachtet werden, daß der freie Raum im Kolben nicht zu groß ist, damit durch den Kolbenprober eine möglichst große Druckerniedrigung erreicht wird.
3. Bei Variante c sollte man eine Motorpumpe nur verwenden, wenn das Sieden bei sehr niedrigen Temperaturen gezeigt werden soll, weil das verdampfte Wasser von der Pumpe mit angesaugt wird und sich im Öl des Pumpengehäuses ansammelt. Das führt zu einer Funktionsminderung der Pumpe.

### 3.4.12. Sieden unter erhöhtem Druck

#### Zu Variante a

1. Weithals-Rundkolben
2. doppelt durchbohrter Stopfen
3. Siedethermometer  $\left(98\text{ }^{\circ}\text{C bis }105\text{ }^{\circ}\text{C; Teilung } \frac{1}{100}\text{ K}\right)$
4. Glasrohr
5. Gummischlauch
6. großer Trichter
7. Bunsenbrenner
8. Kochring mit Stiel
9. Glasröhrenhalter

#### Zu Variante b

Gerät 7., außerdem

10. Papinscher Topf, komplett

#### Methodische Hinweise

1. Variante a ist für die Schüler sehr eindrucksvoll, läßt jedoch nur bedingt eine quantitative Auswertung zu. Bei Variante b kann die Druckabhängigkeit der Siedetemperatur in einer Meßreihe erfaßt werden.
2. Die Variante b ist sehr geeignet, den Schülern die Wirkungsweise von Schnellkochtöpfen zu erklären und auf die Gefahren hinzuweisen, die mit deren unsachgemäßer Handhabung verbunden sind.

#### Variante a: Druckerhöhung durch eine Wassersäule

Man stellt die Versuchsanordnung nach Abbildung 3.4.12./1 zusammen. Beim Füllen mit Wasser darf keine Luftblase im Kolben verbleiben. Durch Zugießen von oben füllt man auch den Schlauch mit Wasser, bis der Wasserstand im Trichter sichtbar ist. Etwa noch im Schlauch gebliebene Luftblasen drückt man heraus. Man erwärmt das Wasser im Kolben bis zum Sieden. Erst bei etwa  $102\text{ }^{\circ}\text{C}$  gelangen die sich bildenden Dampfblasen bis an die Wasseroberfläche im Trichter. Das Wasser im Kolben siedet. Dabei wird die im Schlauch stehende Wassersäule gewaltsam herausgetrieben. Der Trichteröffnung entweicht ein Dampf-Wasser-Gemisch. Der Druck im Kolben wird dadurch verringert. Die Temperatur sinkt sofort auf die normale Siedetemperatur von etwa  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ab. Der Schlauch füllt sich wieder mit dem vom Trichter nachfließenden Wasser. Das Sieden hört mit der damit verbundenen Druckerhöhung schlagartig auf.

#### Bemerkungen

1. Führt man das Erwärmen des Wassers weiter fort, so wiederholt sich der beschriebene Vorgang. Der periodische Wechsel des Siedens bei etwa  $102\text{ }^{\circ}\text{C}$  mit eintretender Eruption und des Absinkens der Temperatur mit Unterbrechung des Siedevorganges veranschaulicht modellartig einen Geiser.
2. Zur Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Druck vergleiche man die Tabelle zu V 1.1.5.

#### Variante b: Verwendung des Papinschen Topfes

Im Papinschen Topf (Abb. 3.4.12./2) wird Wasser mittels eines Bunsenbrenners erwärmt. Der Druck im geschlossenen Topf steigt bis zu einem Wert, der durch die

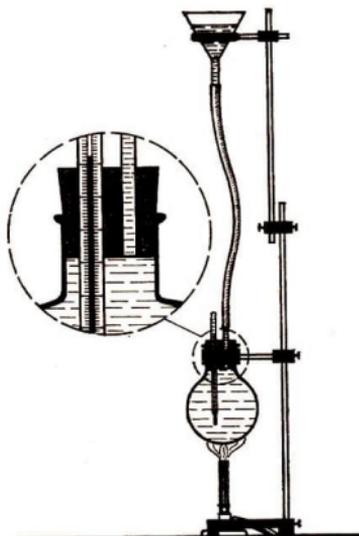


Abb. 3.4.12./1 Sieden unter erhöhtem Druck

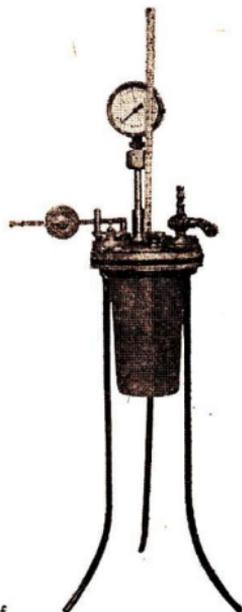


Abb. 3.4.12./2 Papinscher Topf

Einstellung des Ventils bestimmt ist. Sobald der vorgewählte Druck erreicht ist, kann Dampf aus dem Topf entweichen, das Wasser siedet. Die diesem Druck entsprechende Siedetemperatur wird am Thermometer abgelesen. Durch Änderung der Ventileinstellung kann die Druckabhängigkeit der Siedetemperatur in einem begrenzten Bereich oberhalb des äußeren Druckes ermittelt werden.

#### Bemerkung

Die einwandfreie Funktion des Sicherheitsventils muß gewährleistet sein, damit kein unzulässig hoher Druck im Topf entstehen kann, der zu seiner Zerstörung führen könnte (vgl. MH Nr. 2).

### 3.4.13. Zerspringen einer Knallkugel

1. Knallkugel
2. farblose Piacrylplatte oder dicke Glasscheibe (etwa 600 mm × 400 mm × 5 mm)
3. Bunsenbrenner
4. 4 Dreifingerklemmen

#### Methodischer Hinweis

Die Explosion der Knallkugel stellt eine Kesselexplosion im kleinen dar. Aus der Wirkung der Explosion dieses kleinen Kessels mit einem Inhalt von nur 2 ml bis 4 ml kann der Schüler die Wirkung der Explosion eines großen Kessels ermessen.

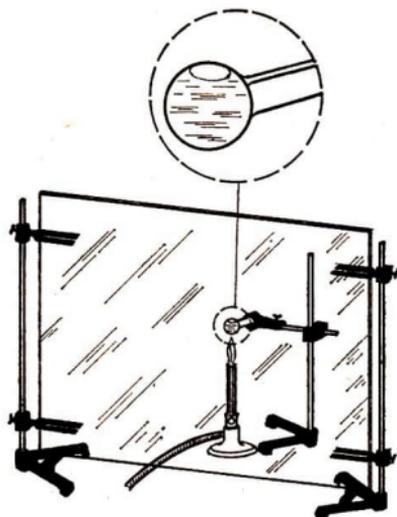


Abb. 3.4.13./1 Versuchsanordnung zum Zerspringen einer Knallkugel

#### Versuch

Die Experimentieranordnung wird gemäß Abbildung 3.4.13./1 aufgebaut. Zwischen die Versuchsgeräte und die Schüler stellt man eine dicke Glasscheibe als Splitterschutz und befestigt eine Knallkugel — das ist eine zum größten Teil mit Wasser gefüllte Kugel — so an einem Stativ, daß sie von der Spitze einer Bunsenbrennerflamme getroffen wird. Etwa 20 s bis 30 s nach dem Entzünden der Flamme explodiert die Kugel mit einem lauten Knall. Durch die Druckwelle verlischt die Gasflamme meistens, deshalb muß der Gashahn sogleich nach der Explosion geschlossen werden.

Man kann die Knallkugel auch auf ein Drahtnetz legen und von unten her durch eine Bunsenbrennerflamme erwärmen.

#### Bemerkung

Der Versuch darf grundsätzlich nur unter Verwendung einer Schutzscheibe ausgeführt werden. Der Lehrer schützt sich durch Tragen einer Schutzbrille und tritt mindestens 4 m von der Versuchsanordnung zurück.



### 3.4.14. Erzeugen überhitzten Dampfes

- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| 1. Erlenmeyerkolben (500 ml)                               | 6. Metallrohr                         |
| 2. Bunsenbrenner mit Dreifuß<br>und Drahtgewebe mit Asbest | 7. weites Glasrohr (Verbrennungsrohr) |
| 3. Glasrohr (gerade und gewinkelt)                         | 8. Thermometer (0 °C bis 100 °C)      |
| 4. zweifach durchbohrter Stopfen                           | 9. Thermometer (0 °C bis 200 °C)      |
| 5. 3 einfach durchbohrte Stopfen                           | 10. Reagenzglashalter                 |
|  | 11. Reihenbunsenbrenner               |

*Methodischer Hinweis*

Mit diesem Experiment wird das Prinzip des Überhitzens von Wasserdampf veranschaulicht, das in den meisten technisch genutzten Dampfkraftmaschinen, wie Kolbendampfmaschine und Dampfturbine, angewandt wird. Die Verwendung überhitzten Dampfes führt zu einem besseren Wirkungsgrad der Anlagen.

*Versuch*

Ein Erlenmeyerkolben wird halb mit Wasser gefüllt und nach Abbildung 3.4.14./1 durch ein gewinkeltes Abzugsrohr an ein eisernes Rohr angeschlossen. Von dem

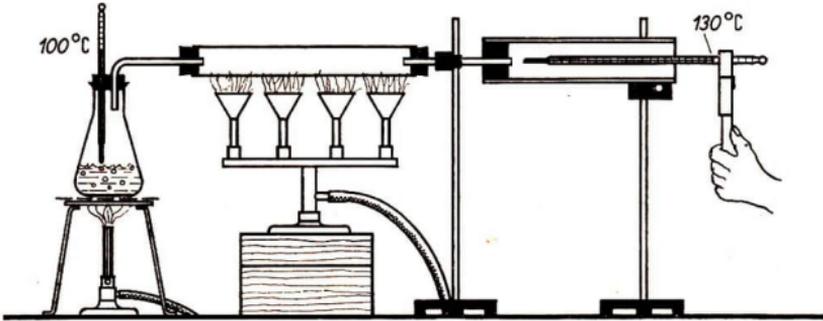


Abb. 3.4.14./1 Erzeugen überhitzten Wasserdampfes

eisernen Rohr führt eine von einem Stativ gehaltene gerade Glasröhre zu einem weiten Glasrohr, dessen freies Ende auf einem horizontalen, kurzen Stativstab aufliegt.

Man erwärmt das Wasser bis zum Sieden. Der Dampf entweicht in das Metallrohr, wo er durch einen daruntergestellten Reihensystembrenner weiterhin stark erwärmt wird. Er strömt überhitzt in die weite Glasröhre. Ein in diese gehaltenes Thermometer zeigt etwa 130 °C an, während im Siedegefäß eine Temperatur von ungefähr 100 °C herrscht.

Damit man sich an dem heißen Dampf nicht verbrüht, empfiehlt es sich, das Thermometer mit einem Reagenzglashalter zu fassen.

*Bemerkung*

Wird statt des Reihensystembrenners ein einfacher Brenner verwendet, so versieht man diesen mit einem Schlitzaufsatz, um einen möglichst großen Abschnitt des Rohres zu erwärmen.

### 3.4.15. Modellexperimente zum Verdunsten, Sieden und Destillieren mit dem Gerät zur kinetischen Gastheorie

- |                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| 1. Gerät zur kinetischen Gastheorie | 4. Filterpapier                          |
| 2. Universal-Experimentiermotor     | 5. Holz- oder Plastikplatte              |
| 3. Becherglas                       | (40 mm × 50 mm × 7 mm) als Blindschieber |

*Methodischer Hinweis*

Diese Experimente sollten eingesetzt werden, wenn die Erklärung des Verdunstens, Siedens und Destillierens mit Hilfe des Teilchenmodells vorgenommen wird. Es können sowohl qualitative als auch quantitative Zusammenhänge dargestellt werden. Auf die Grenzen dieses Modells sollte unbedingt hingewiesen werden.

*Versuch 1: Modellexperiment zum Verdunsten und Sieden*

Das Grundgerät und der Universal-Experimentiermotor werden mit Stativstäben und Tischklemmen am Experimentiertisch befestigt (Abb. 3.4.15./1). Über einen Gummiringen und Riemenscheiben wird die Verbindung zwischen der Welle des Grundgerätes und der Motorwelle des Experimentiermotors hergestellt.

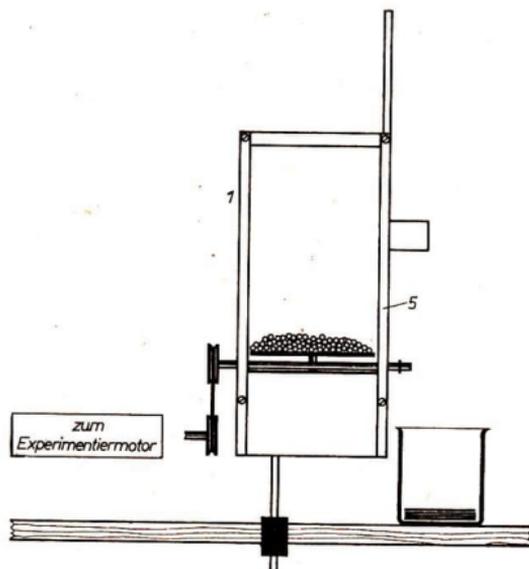


Abb. 3.4.15./1 Modellexperiment zum Verdunsten, Sieden und Destillieren mit dem Gerät zur kinetischen Gastheorie

Die Kammer wird seitlich durch den kurzen, selbstgefertigten Blindschieber (5), einen Kugelfänger und einen weiteren Blindschieber so verschlossen, daß der Kugelfänger etwa 50 mm über dem mittleren Niveau der Bodenplatte liegt.

In die Kammer füllt man Stahlkugeln von 2,5 mm Durchmesser und verschließt die Kammer mit dem Deckel.

Unter den Kugelfänger wird ein Becherglas gestellt, in welches einige Lagen Filterpapier gelegt werden, um ein Zurückspringen der Kugeln zu verhindern.

Stellt man nun die Frequenz der Bodenplatte des Gerätes so ein, daß nur wenige Kugeln bis in die Höhe des Kugelfängers gelangen, dann entspricht das einer niedrigen Temperatur. Das Verdunsten erfolgt langsam, nur wenige Kugeln gelangen je Zeiteinheit in den Kugelfänger.

Nach dem Erhöhen der Frequenz springen die Kugeln höher, und es gelangen mehr in den Kugelfänger. Das entspricht zunehmender Temperatur und wachsender Ver-

dunstungsgeschwindigkeit. Immer mehr Oberflächenteilchen der Flüssigkeit erhalten soviel Energie, wie zum Verlassen der Flüssigkeit erforderlich ist. Durch weitere Frequenzsteigerung kann schließlich der Fall des Siedens dargestellt werden. In der gesamten Flüssigkeit bzw. in der ganzen Kammer sind viele Teilchen vorhanden, die genügend Energie besitzen, um die Flüssigkeit bzw. die Kammer verlassen zu können.

#### *Versuch 2: Modellexperiment zum Destillieren*

Der Geräteaufbau erfolgt wie bei Versuch 1, nur werden statt der Stahlkugeln von 2,5 mm Durchmesser jetzt die Stahlkugeln von 4 mm Durchmesser und die Glaskugeln von 4 mm Durchmesser verwendet. Das Gemisch aus beiden Kugelsorten wird in die Kammer gefüllt. Die Stahlkugeln stellen die Teilchen des gelösten Stoffes bzw. der schwerer siedenden Komponente des Flüssigkeitsgemisches dar, die Glaskugeln dagegen die Teilchen des Lösungsmittels bzw. der leichter siedenden Komponente. Bei niedriger Frequenz der Bodenplatte beobachtet man, daß zunächst nur wenige, aber ausschließlich Glaskugeln, durch den Kugelfänger ausgeworfen werden. Mit steigender Frequenz nimmt zwar die je Zeiteinheit ausgeworfene Anzahl der Glaskugeln zu, jedoch gelangen zunehmend auch Stahlkugeln in den Auswerfer. Dieses Ergebnis entspricht den tatsächlichen Verhältnissen bei der Destillation, bei der eine Erhöhung der Destillationsgeschwindigkeit zu einer Verschlechterung der Trennung führt.

#### *Bemerkungen*

1. Hinweise zum Aufbau und für weitere Experimente enthält die Experimentieranleitung zum Gerät zur kinetischen Gastheorie.
2. Verwendet man bei Versuch 2 Glaskugeln einheitlicher Größe, aber in zwei verschiedenen Farben, so zeigt es sich, daß im „Destillat“ das gleiche Mischungsverhältnis vorliegt wie im Ausgangsprodukt. Stoffe mit gleicher Siedetemperatur können also durch eine Destillation nicht getrennt werden.

## 4. Wärmeausbreitung

### 4.0. Methodische Bemerkungen

**4.0.0.** Mit Erscheinungen der Wärmeausbreitung (Wärmeübertragung) werden die Schüler ständig konfrontiert, sie gehören zu ihrem unmittelbaren Erfahrungsbereich. Die hier beschriebenen Versuche wurden u. a. auch deshalb so ausgewählt, damit möglichst viele Erfahrungen der Schüler genutzt werden können.

Alle in diesem Kapitel beschriebenen Experimente führen zu nur qualitativ auswertbaren Ergebnissen. Die gefundenen Gesetzmäßigkeiten sind aber alle von großer Bedeutung für die praktische Anwendung. In Auswertung der Experimente bieten sich daher viele Anknüpfungspunkte für die erzieherische Einwirkung des Lehrers auf die Schüler (Energiewirtschaft, Arbeits- und Brandschutz u. a.).

**4.0.1.** Im Abschnitt 4.1. sind Versuche zur Wärmeleitung zusammengestellt.

Mit den Versuchen 4.1.1., 4.1.3. und 4.1.4. können die Schüler selbständig die Wärmeleitfähigkeit fester, flüssiger und gasförmiger Stoffe untersuchen. Sie können dabei Einsichten in die technische Nutzung der gefundenen Kenntnisse über Materialeigenschaften gewinnen.

Der Versuch 4.1.2. (halbquantitativ) kann im Anfangsunterricht dazu genutzt werden, die Schüler an verschiedene Methoden der Auswertung physikalischer Messungen heranzuführen.

**4.0.2.** Im Abschnitt 4.2. sind Versuche zur Wärmeströmung zusammengestellt. Der Einführungsversuch 4.2.1. soll helfen, die Begriffe Wärmeleitung und Wärmeströmung gegeneinander abzugrenzen. Bei der Auswahl wurde die Wärmeströmung in Flüssigkeiten und Gasen gleichermaßen berücksichtigt. Alle Experimente sind ohne nennenswerte Schwierigkeiten durchführbar. Der Lehrer sollte deshalb ebenfalls die Auswahl so treffen, daß die Wärmeströmung in beiden Medienarten demonstriert wird.

**4.0.3.** Alle Versuche zur Wärmestrahlung im Abschnitt 4.3. können schon im Anfangsunterricht gezeigt werden. Dabei sollte man das Radiometer im Versuch 4.3.4. vor allem als historisches Gerät vorführen. Seine Wirkungsweise kann den Schülern erst später erklärt werden.

## 4.1. Wärmeleitung

### 4.1.1. Versuche zur Einführung in die Wärmeleitung [SE]

#### Zu Variante a

1. Münze oder anderes Metallstück
2. Streichhölzer



Abb. 4.1.1./1 Erhitzen einer Münze durch eine Streichholzflamme

#### Zu Variante b

3. Stäbe aus verschiedenen Metallen
4. Bunsenbrenner

#### Zu Variante c

5. Becherglas (250 ml)
6. 4 Krampen (aus SEG Mechanik) oder verschiedene Stäbe (Metalle, Glas, Plast o. ä.)

#### Methodische Hinweise

1. Das Ergebnis von Variante a ist für die Schüler überraschend. Der Versuch eignet sich deshalb besonders gut für die Einführung in die Wärmeleitung.
2. Die Varianten b und c gestatten über die Feststellung der Wärmeleitung hinaus die Beobachtung von stoffabhängigen Unterschieden in der Wärmeleitfähigkeit.

#### Variante a

Ein Schüler erfaßt eine Münze oder ein anderes kleines Metallstück am Rand. Mit der Flamme eines Streichholzes erwärmt man das Metallstück am gegenüberliegenden Rand (Abb. 4.1.1./1). Der Schüler wird das Metallstück fallen lassen, noch ehe das Streichholz so weit abgebrannt ist, daß es nicht mehr gehalten werden kann.

#### Variante b

Einige Schüler fassen die Metallstäbe an einem Ende an und halten sie auf Kommando mit dem anderen Ende gleichzeitig in die Flamme eines Bunsenbrenners (Abb. 4.1.1./2). Schon nach relativ kurzer Zeit werden die festgehaltenen Enden so heiß, daß die Stäbe losgelassen werden müssen. Da die Zeit bis zum Loslassen der Stäbe unterschiedlich ist, kann man auf unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Metalle schließen.

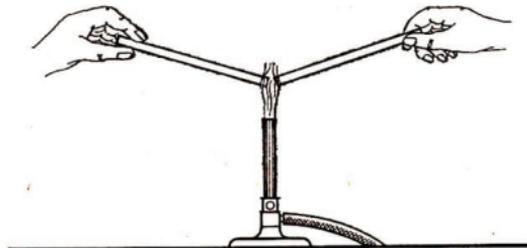


Abb. 4.1.1./2 Prüfen der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Metallstäbe

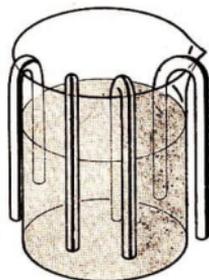


Abb. 4.1.1./3 Schülerexperiment zur Wärmeleitfähigkeit fester Stoffe

*Variante c*

Über den Rand des Becherglases werden die 4 Krampen aus dem SEG Mechanik gehängt, oder es werden verschiedenen Stäbe in das Glas gestellt. Das Glas wird mit heißem Wasser bis wenig unter dem Rand gefüllt (Abb. 4.1.1./3). Durch Betasten kann die unterschiedliche Ausbreitung der dem heißen Wasser entzogenen Wärmeenergie längs der freien Schenkel der Krampen bzw. längs der Stäbe festgestellt werden. Man kann die Ausbreitung auch visuell verfolgen, wenn man die äußeren Schenkel der Krampen vorher durch kurzzeitiges Eintauchen in flüssiges, möglichst gefärbtes Stearin mit einer dünnen Schicht überzieht. Das Stearin wird beim Erreichen der Schmelztemperatur glasig und tropft schließlich ab.

*Bemerkungen*

1. Wegen der Verbrennungsgefahr ist bei den Varianten a und b darauf zu achten, daß die Schüler nicht aus übertriebenem Ehrgeiz das Metallstück bzw. die Stäbe zu lange festhalten.
2. Soll bei den Varianten b und c die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe festgestellt werden, so ist auf gleiche Anfangstemperatur zu achten.
3. Variante c ist auch als Hausexperiment geeignet. Es können Teelöffel oder Stäbe (z. B. Stricknadeln) aus verschiedenen Materialien verwendet werden.

#### 4.1.2. Nachweis der unterschiedlichen Leitfähigkeit verschiedener fester Stoffe mit dem Gerät zur Demonstration der Wärmeleitfähigkeit

*Zu Variante a*

1. Gerät zur Demonstration der Wärmeleitfähigkeit
2. Becherglas (1000 ml)
3. Stearinkerze
4. Tauchsieder oder Heizplatte oder Bunsenbrenner mit Dreifuß

*Zu Variante b*

- Geräte 1. bis 4., außerdem
5. Zentraluhr oder 4 Stoppuhren oder 4 Uhren mit Sekundenzeiger

*Methodische Hinweise*

1. Das Gerät eignet sich zum *qualitativen* Nachweis der unterschiedlichen Wärmeausbreitung in verschiedenen festen Stoffen.
2. Bei Durchführung der Variante b (Übung im Anlegen von Tabellen sowie im Anfertigen und Auswerten von Diagrammen) ist zu beachten, daß die Ausbreitung der Wärme längs der Stäbe nicht proportional zur Zeit erfolgt, also kein linearer Kurvenverlauf zu erwarten ist. Das Diagramm gestattet lediglich einen groben Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten.

*Variante a**Versuchsaufbau*

Zur Vorbereitung des Gerätes für das Experiment wird die Halterung mit den Stäben waagrecht gelegt, mit einer brennenden Kerze wenig Stearin in die Kerben geträufelt und je eine Stahlkugel eingelegt. Bei wiederholtem Gebrauch des Gerätes genügt zum Befestigen der Kugeln das Erwärmen der Kugeln oder der Stäbe. Der Behälter des Gerätes wird mit der erforderlichen Menge Wasser (etwa 900 ml) ge-

füllt, das vorher mittels des Tauchsieders im Becherglas bis zum Sieden erwärmt wurde. Es kann auch direkt im Behälter mittels Bunsenbrennerflamme oder Heizplatte auf etwa 90 °C erwärmt werden.

### Versuchsdurchführung

Der Deckel mit den fünf Probestäben wird auf den Behälter mit dem heißen Wasser so aufgesetzt, daß alle Stäbe an einem Ende gleich tief eintauchen. Die dem heißen Wasser entzogene Wärmeenergie breitet sich zu den freien Stabenden hin aus. Beim Erreichen der Schmelztemperatur des Stearins (etwa 50 °C) an den Kerbestellen lösen sich jeweils die dort befestigten Kugeln und fallen herab (Abb. 4.1.2./1). Wenn alle Kugeln vom Kupferstab abgefallen sind (nach etwa 2 min, bei 90 °C Wassertemperatur), wird das Experiment beendet und die Halterung mit den Stäben abgenommen.

Durch Auszählen der an den anderen Stäben noch anhaftenden Kugeln läßt sich ein grober Vergleich der Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Stoffe anstellen.

### Beispiel

Stoff	Kupfer	Aluminium	Messing	Stahl	Plast
Anzahl der abgefallenen Kugeln	5	3	2	1	0

### Variante b

4 Schülergruppen erhalten je eine Uhr mit Sekundenzeiger oder eine Stoppuhr, falls die Zentraluhr nicht eingesetzt werden kann. Vorbereitung und Durchführung des Experimentes erfolgen wie bei Variante a. Jede Gruppe beobachtet einen Stab. Von den Schülern werden die Zeiten gemessen, die bis zum Abfallen der 1., 2., ..., 5. Kugel vergehen. Diese Zeiten werden in eine an der Tafel vorbereitete Tabelle eingetragen. Nach einiger Zeit (z. B. 5 min, bei 90 °C Wassertemperatur) wird das Experiment beendet.

Die Meßwerte werden grafisch dargestellt (Abb. 4.1.2./2). Mit dem Diagramm lassen sich die Eigenschaften der verschiedenen Stoffe bezüglich der Wärmeleitung anschaulich vergleichen.

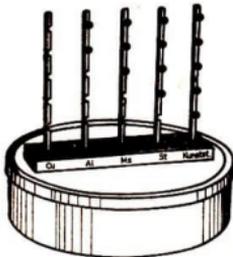


Abb. 4.1.2./1 Gerät zur Demonstration der Wärmeleitfähigkeit

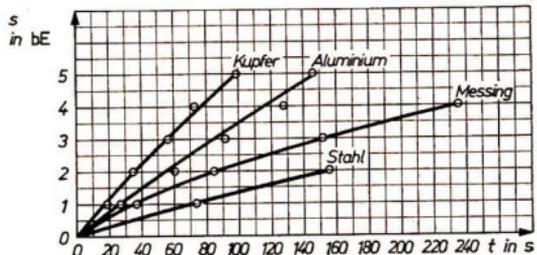


Abb. 4.1.2./2 Diagramm zur Auswertung des Versuchs zur Wärmeleitfähigkeit fester Stoffe (s entspricht Kugel-Nr.)

Beispiel (Wassertemperatur etwa 95 °C, Versuchsdauer 4 min)

Stoff	Zeit (in s) bis zum Abfallen der Kugel				
	1	2	3	4	5
Kupfer	19	35	57	73	99
Aluminium	27	61	92	128	146
Messing	37	85	152	235	—
Stahl	74	156	—	—	—
Plast	—	—	—	—	—

*Bemerkungen*

1. Zur Verbesserung der Sichtbarkeit ist Schattenwurf möglich. Dazu werden nach Lösen der Befestigungsschrauben für die Probestäbe am Grundkörper die Stäbe so eingesetzt, wie es Abbildung 4.1.2./1 zeigt.
2. Bei Variante a kann das Abfallen weiterer Kugeln nach dem Versuch durch kurzzeitiges Abkühlen der Stäbe mit kaltem Wasser vermieden werden.
3. Bei Variante b empfiehlt es sich, die Temperatur des Wassers möglichst konstant zu halten. Zweckmäßig verwendet man zum Versuchsaufbau einen Dreifuß und führt mit schwach eingestellter Bunsenbrennerflamme die dazu notwendige Wärmeenergie zu.
4. Die Stäbe sind so in den Grundkörper einzusetzen, daß der Abstand zwischen der Wasseroberfläche und der ersten Kugel etwa 2,5 cm beträgt.

**4.1.3. Wärmeleitfähigkeit des Wassers**

*Zu Variante a*

1. Großes Reagenzglas (∅ 30 mm; 200 mm lang)
2. Bunsenbrenner
3. Eis
4. Draht

*Zu Variante b*

Geräte 1. und 2.

*Methodischer Hinweis*

Mit diesen Versuchen läßt sich die schlechte Wärmeleitfähigkeit des Wassers eindrucksvoll nachweisen. Variante b sollte nur dann eingesetzt werden, wenn kein Eis zur Verfügung steht.

*Variante a*

Das Reagenzglas wird mit Stativmaterial entsprechend Abbildung 4.1.3./1 befestigt und fast bis zum oberen Rand mit Wasser gefüllt. Ein Stück Eis wird durch Umwickeln mit Draht so beschwert, daß es im Wasser sinkt, und in das Reagenzglas gebracht. Der Bunsenbrenner wird so unter das Reagenzglas gestellt, daß seine Flamme das Glas etwa im oberen Viertel trifft. Das Wasser beginnt dort zu sieden,

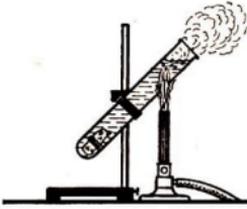


Abb. 4.1.3./1 Schlechte Wärmeleitfähigkeit des Wassers — Eis unter siedendem Wasser

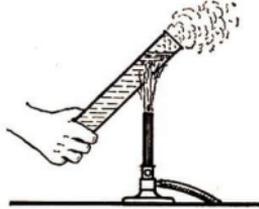


Abb. 4.1.3./2 Schlechte Wärmeleitfähigkeit des Wassers — Festhalten eines Reagenzglases mit siedendem Wasser

während das Eis am Boden unverändert liegen bleibt. Wasser erweist sich als schlechter Wärmeleiter.

#### Variante b

Das Reagenzglas wird fast bis zum oberen Rand mit kaltem Wasser gefüllt, am unteren Ende angefaßt und schräg über die Bunsenbrennerflamme gehalten, so daß die Flamme das Glas im oberen Teil trifft (Abb. 4.1.3./2). Während das Wasser im oberen Teil des Glases siedet, empfindet man in der haltenden Hand kaum eine Temperaturzunahme. Wasser erweist sich als schlechter Wärmeleiter.

#### Bemerkungen

1. Das verwendete Wasser sollte möglichst kalt sein (Schmelzwasser des Eises).
2. Um das Auftreten von Wärmeströmung bei diesem Experiment so weit wie möglich zu vermeiden, darf die Flamme nicht zu tief am Reagenzglas angesetzt werden.
3. Das Temperaturgefälle kann auch mittels Thermometer nachgewiesen werden. Zweckmäßigerweise führt ein Schüler die Messung unter Anleitung des Lehrers durch. Das Thermometer wird, am Boden beginnend, verschieden tief eingetaucht, und die Temperaturen werden abgelesen.

### 4.1.4. Wärmeleitfähigkeit der Luft [SE]

1. 2 leere, blanke Konservendosen verschiedenen Durchmessers
2. Korkstücke oder Knüllpapier

#### Methodischer Hinweis

Dieser Versuch ist geeignet, den Schülern die Wirkungsweise von Kalorimetergefäßen zu verdeutlichen.

#### Versuch

Die Konservendose mit dem kleineren Durchmesser wird mit heißem Wasser gefüllt. Durch Betasten stellen die Schüler fest, daß sich die Temperatur der Außenseite der Blechdose sehr schnell erhöht. Metalle sind sehr gute Wärmeleiter. Danach wird das Wasser wieder ausgossen und die Dose unter Verwendung der Korkstücke oder des Knüllpapiers so in die größere Konservendose gestellt, daß überall ein etwa gleich großer Abstand zwischen den Dosen ist. Füllt man jetzt die innere

Dose wieder mit heißem Wasser, so erwärmt sich die äußere Dose kaum. Die Luft im Raum zwischen den Dosen erweist sich als schlechter Wärmeleiter.

*Bemerkungen*

1. Um den Einfluß der Wärmestrahlung gering zu halten, sollten die Dosen möglichst blank sein.
2. Die Differenz der Dosendurchmesser sollte mindestens 10 mm betragen.
3. Um Verletzungen vorzubeugen, ist der Dosenrand vorher stumpf zu klopfen.
4. Zum Herstellen des Abstandes brauchen nur 4 Korkstücke oder fest geknüllte Papierkügelchen verwendet zu werden (1 am Boden, 3 am Zylindermantel).

## 4.2. Wärmeströmung

### 4.2.1. Übergang von der Wärmeleitung zur Wärmeströmung

- |                               |               |
|-------------------------------|---------------|
| 1. Becherglas (1000 ml; hoch) | 3. Sägemehl   |
| 2. Tauchsieder                | 4. Wachskugel |

*Methodischer Hinweis*

Dieser Versuch ist im ersten Teil eine Wiederholung des Versuchs 4.1.3., ermöglicht aber gerade deshalb dem Lehrer, die Unterschiede zwischen Wärmeleitung und Wärmeströmung deutlich zu kennzeichnen.

*Versuch*

Die in der Hand erwärmte Wachskugel wird etwa 5 cm über dem Boden an die Innenwand des Becherglases gedrückt, so daß sie dort haften bleibt. Das Glas wird mit kaltem Wasser gefüllt, dem man etwas aufgeschwemmtes Sägemehl zugibt, das sich am Boden absetzt.

Taucht man den Tauchsieder nur wenig ein, so daß er gerade hinreichend mit Wasser bedeckt ist, kommt das Wasser nur an der Oberfläche zum Sieden, während es im unteren Teil des Gefäßes kalt bleibt (vgl. V 4.1.3.). Die Wachskugel bleibt haften, das Sägemehl bleibt liegen (Abb. 4.2.1./1).



Abb. 4.2.1./1 Fehlen einer Wärmeströmung im Becherglas bei Erwärmung von Wasser an der Oberfläche

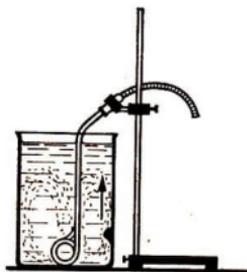


Abb. 4.2.1./2 Auftreten der Wärmeströmung im Becherglas bei Erwärmung des Wassers am Boden

Senkt man danach den Tauchsieder bis zum Boden des Gefäßes ab, hört das Wasser an der Oberfläche auf zu sieden. Stattdessen setzt eine Wärmeströmung ein, die an dem mitgeführten Sägemehl gut zu beobachten ist. Die Wachskugel löst sich von der Gefäßwand, die nun vom vorbeiströmenden Wasser erwärmt wird, und steigt nach oben (Abb. 4.2.1./2).

## 4.2.2. Sieden von Wasser in einer Papiertüte

1. Blatt Papier (A 4)
2. Kochring mit Stiel  
( $\varnothing$  70mm, aus SEG Kalorik)
3. Bunsenbrenner

### Methodischer Hinweis

Daß Wasser in einer Papiertüte zum Sieden gebracht werden kann, erscheint den Schülern unglaublich. Der Versuch ist deshalb zur Problemstellung für die Einführung in die Wärmelehre zu empfehlen.

### Versuch

Ein Blatt Schreibpapier wird nach Abbildung 4.2.2./1 zu einer Tüte gefaltet, in den Kochring eingehängt und bis über den Ring mit Wasser gefüllt. Stellt man einen mit mäßiger Flamme brennenden Bunsenbrenner darunter, so beginnt das Wasser nach einiger Zeit zu sieden, ohne daß die Tüte verbrennt (Abb. 4.2.2./2).

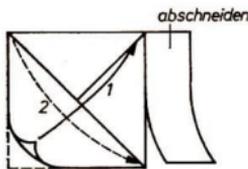


Abb. 4.2.2./1 Falten einer Papiertüte zum Sieden von Wasser

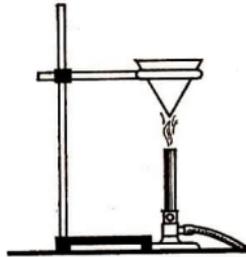


Abb. 4.2.2./2 Sieden von Wasser in einer Papiertüte

Die von der Bunsenbrennerflamme zugeführte Wärmeenergie wird durch die einsetzende Wärmeströmung sofort abgeleitet, so daß die Entzündungstemperatur des Papiers nicht erreicht wird.

### Bemerkung

Der über die Wasseroberfläche hinausragende Teil der Papiertüte kann bei der Durchführung des Versuchs Feuer fangen und bis zur Wasseroberfläche abbrennen. Dadurch wird das Versuchsergebnis noch eindrucksvoller.

### 4.2.3. Wärmeströmung in einer Zirkulationsröhre

1. Glasröhre zur Demonstration der Zirkulation erwärmten Wassers
2. Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtgewebe mit Asbest

#### Versuch

In eine Glasröhre zur Demonstration der Zirkulation erwärmten Wassers schüttet man eine geringe Menge vorher eingeweichten Sägemehls, und füllt das Glas langsam mit Wasser. Dadurch, daß man die Röhre schräg hält, kann man erreichen, daß sich die Späne in einer der unteren Ecken absetzen. Man klemmt die Röhre an ein Stativ. Damit sie nicht unmittelbar von der Flamme berührt wird, stellt man einen mit Drahtgewebe bedeckten Dreifuß unter die freie untere Ecke. Stellt man darunter einen Bunsenbrenner und erwärmt dadurch das Wasser, so steigen die Sägespäne auf dieser Seite nach oben und sinken an der anderen Seite nach unten (Abb. 4.2.3./1).

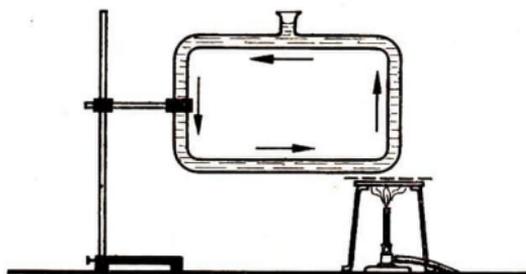


Abb. 4.2.3./1 Wärmeströmung in einer Zirkulationsröhre

An Stelle des Sägemehls kann man bei diesem Versuch auch Kaliumpermanganat verwenden. Man füllt die Röhre mit Wasser und wickelt ein Körnchen Kaliumpermanganat in ein Stück Stanniol. Das Rohr hält man so, daß das eingewickelte Permanganat schnell zur unteren Ecke absinkt. Dadurch vermeidet man, daß das Wasser schon vorzeitig gefärbt wird.

#### Bemerkung

Steht die Zirkulationsröhre nicht zur Verfügung, so kann ein Rundkolben (1000 ml) verwendet werden (Abb. 4.2.3./2).

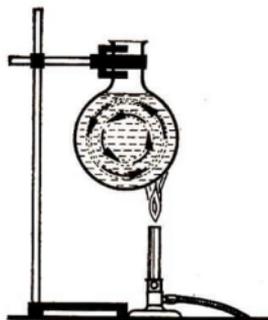


Abb. 4.2.3./2 Wärmeströmung in einem Rundkolben

#### 4.2.4. Wärmeströmung an einem Türspalt

Kerze im Kerzenhalter

##### Versuch

Eine Tür, die aus dem Klassenzimmer in einen anderen Raum führt, wird um einen Spalt geöffnet. Führt man eine brennende Kerze am Spalt entlang, so wird die Flammenspitze in Richtung der jeweils vorhandenen Luftströmung abgelenkt. Sie weist am Boden vom kälteren zum wärmeren Raum, im oberen Teil des Spaltes dagegen vom wärmeren zum kälteren Raum (Abb. 4.2.4./1).

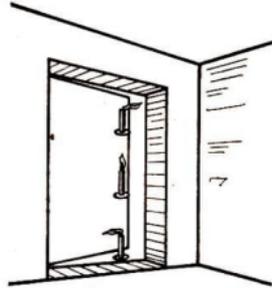


Abb. 4.2.4./1 Wärmeströmung an einem Türspalt

##### Bemerkung

Der Versuch gelingt nur dann überzeugend, wenn eine hinreichend große Temperaturdifferenz zwischen den Räumen vorhanden ist.

#### 4.2.5. Luftströmung über Wärmequellen [SE]

1. Stativheizplatte
2. Reagenzglashalter
3. Magnetnadelträger
4. Trinkbecher aus Pappe

##### Versuch

Von dem Trinkbecher wird der obere versteifte Rand abgeschnitten. Durch Schnitte längs der Mantellinien wird der Kegelstumpf in etwa 2 cm breite Streifen zerteilt, die gemäß Abbildung 4.2.5./1 unter einem Winkel von etwa  $60^\circ$  gegen die Mantellinien nach außen abgeknickt werden. In die Mitte des Bodens wird eine leicht nach außen gewölbte Vertiefung gedrückt. Der Versuchsaufbau erfolgt gemäß Abbildung 4.2.5./2.

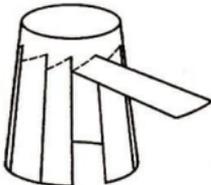


Abb. 4.2.5./1 Herstellung eines Windrädchens aus einem Trinkbecher aus Pappe

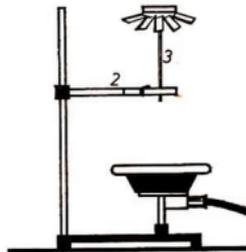


Abb. 4.2.5./2 Luftströmung über einer Heizplatte

Nach Einschalten der Heizplatte gerät das Windrad durch den einsetzenden Warmluftstrom rasch in Drehung.

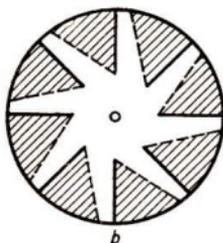
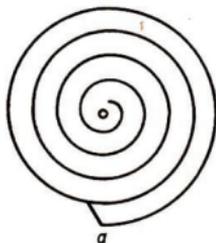


Abb. 4.2.5./3 Muster zum Ausschneiden  
a) einer Drehschlange  
und  
b) eines Windrädchens

*Bemerkung*

Anstelle des präparierten Trinkbechers können auch aus Zeichenkarton ausgeschnittene Drehschlangen (Abb. 4.2.5./3a) oder Windrädchen (Abb. 4.2.5./3b) benutzt werden. Die schraffierten Teile des Windrädchens werden längs der gestrichelten Linien etwa 30° nach oben gebogen.



**4.2.6. Wärmeströmung der Luft im geheizten Zimmer**

*Zu Variante a*

1. Großer Glaskasten
2. Köchring mit Stiel
3. Drahtgewebe
4. Bunsenbrenner
5. Filterpapier

*Zu Variante b*

6. Kolbenluftpumpe mit Dreiweghahn
7. Luftballon

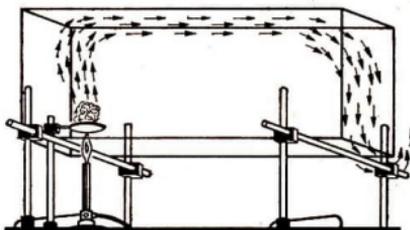


Abb. 4.2.6./1 Modell der Wärmeströmung im geheizten Zimmer

*Methodischer Hinweis*

Variante a ist immer durchführbar, dagegen setzt der direkte Nachweis der Luftströmung nach Variante b ein geheiztes Zimmer voraus.

*Variante a*

Der Aufbau des Versuchs erfolgt nach Abbildung 4.2.6./1. Auf das Drahtnetz wird ein Stück fest zusammengeknülltes Filterpapier gelegt. Die Bunsenbrennerflamme wird so schwach eingestellt, daß sie nicht durch das Drahtgewebe durchschlägt. Das Filterpapier verschwelt unter starker Raumentwicklung. Im darübergestülpten Glaskasten steigt der Rauch über der Flamme empor, zieht an der Decke des Glaskastens entlang und sinkt an der entgegengesetzten Wand nieder. Er kennzeichnet den Weg der Luftströmung.

## Variante b

Man füllt einen Luftballon mit Hilfe einer Kolbenluftpumpe, die man an die Stadtgasleitung anschließt, mit Gas. Den Dreiweghahn stellt man so ein, daß die Gasleitung beim Herausziehen des Kolbens mit dem Zylinder verbunden ist. Beim Hineinstoßen des Kolbens muß der Zylinder an den Ballon angeschlossen sein. Der Teller der Pumpe wird abgeschraubt. An den dabei freiwerdenden Gewindestutzen der Rezipientenöffnung wird der Ballon angebunden, wenn der Stiefel durch mehrfaches Ansaugen und Ausstoßen von den Luftresten gesäubert ist. Sollte sich der Teller schwer abschrauben lassen, dann kann man sich auch so behelfen, daß man in die Öffnung des Tellers einen einfach durchbohrten Stopfen steckt. In diesem befindet sich eine kurze gerade Röhre, an der man den Ballon festbindet (Abb. 4.2.6./2).

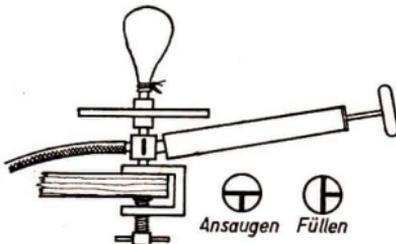


Abb. 4.2.6./2 Füllen eines Luftballons mit Stadtgas

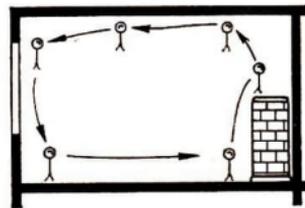


Abb. 4.2.6./3 Wärmeströmung im geheizten Zimmer

Der Ballon wird so weit gefüllt, daß er im kalten Flur gerade über dem Boden schwebt. Wenn er einen zu großen Auftrieb hat, so hängt man ihm etwas Ballast an. Bringt man den gefüllten Ballon in einem geheizten Zimmer in die Nähe des Ofens, so steigt er mit der Luftströmung empor. Er schwebt unter der Decke entlang und sinkt an der Fensterwand wieder nieder. Am Boden schwebt er langsam auf den Ofen zu und beginnt seinen Kreislauf von neuem (Abb. 4.2.6./3).

Der Versuch gelingt auch in zentralbeheizten Räumen, in denen sich die Heizkörper unter den Fenstern befinden.

Der Raum wird vorher gut belüftet, damit er sich etwas abkühlt. Danach werden die Fenster verschlossen. Der Kreislauf des Ballons ist jetzt umgekehrt, d. h., er steigt an der Fensterseite über den Heizkörpern zur Decke, schwebt dann zur gegenüberliegenden Wand, an der er absinkt, und über dem Fußboden wieder zu den Heizkörpern.

## Bemerkungen

1. Bei Variante a kann anstelle des Glaskastens auch eine große Kiste verwendet werden die nach vorn mit einer genügend großen Glasscheibe abgedeckt wird und nach unten mit Öffnungen zum Lufteintritt und Rauchabzug versehen ist.
2. Die Sichtbarkeit kann bei Variante a dadurch verbessert werden, daß man die Rückseite des Glaskastens mit schwarzem Papier abdeckt und den Glaskasten bzw. die Kiste von unten her beleuchtet.
3. Bei Variante b kann in Räumen, in denen sich die Heizkörper unter den Fenstern befinden, der Ballon schon vorzeitig (etwa in der Mitte des Raumes) absinken, wenn der Raum vorher nicht genügend abgekühlt war bzw. die Heizkörper nur eine geringe Heizleistung haben

## 4.2.7. Schornsteinmodell

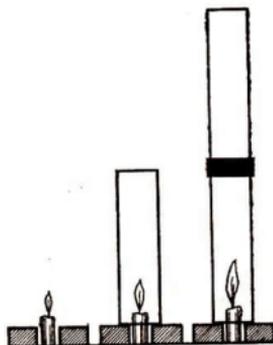
1. Kerze
2. 2 Holzunterlagen
3. 2 weite Glasröhren ( $\varnothing$  etwa 40 mm bis 60 mm; Länge etwa 230 mm)
4. Kartonstreifen

### Versuch

Man klebt um den einen Rand der einen Röhre einen etwa 20 mm breiten Streifen aus weichem Karton, so daß er etwa 10 mm über den Rand hinausragt. Man schafft auf diese Weise die Möglichkeit, die beiden Röhren mühelos und sicher aneinanderzufügen. Die Kerze stellt man zwischen zwei Holzunterlagen auf den Tisch und entzündet sie (Abb. 4.2.7./1). Sie brennt mit kleiner Flamme. Stülpt man eine Glasröhre darüber, so daß sie auf den beiden Holzunterlagen aufliegt, dann erkennt man, daß die Flamme heller brennt und etwas länger wird.

Verlängert man die Röhre um eine zweite, wobei man die mit dem angeklebten Haltestreifen aufsetzt, so wird die Flamme noch länger. Es entsteht in dem Glasrohr wie in einem Schornstein ein kräftiger Luftstrom nach oben. Man kann ihn dadurch veranschaulichen, daß man ein ganz leichtes, aufgelockertes Wattebäuschchen mit einer Pinzette an die untere Öffnung hält. Es wird vom Luftstrom ergriffen und durch die Röhre nach oben getragen. Der Luftstrom wird sofort unterbrochen, wenn man die Röhre oben abdeckt oder die Holzunterlagen fortnimmt.

Abb. 4.2.7./1 Schornsteinmodell



## 4.3. Wärmestrahlung

### 4.3.1. Reflexion der Wärmestrahlung an Metallspiegeln

#### Zu Versuch 1, Variante a

1. 2 sphärische Hohlspiegel aus Metall
2. Lampenträger mit Lampenfassung E 14
3. Glühlampe (6 V; 30 W)
4. Lampentransformator
5. Schauthermometer

#### Zu Versuch 1, Variante b

Geräte 1. bis 4., außerdem

6. Thermistor (Kaltwiderstand 100  $\Omega$  bis 1000  $\Omega$ ) und Strommesser (Meßbereich 3 mA oder 10 mA) und Stromversorgungsgerät (0 bis 20 V—)

## Zu Versuch 2

Geräte 1. bis 4. und 6., außerdem  
7. blanke Blechtafel (z. B. Aluminium)

## Versuch 1

## Variante a

Zwei Hohlspiegel aus Metall werden einander zugekehrt im Abstand von 1,5 m bis 2 m aufgestellt (Abb. 4.3.1./1). Im Brennpunkt des einen Spiegels wird die Glühlampe angebracht. Ihre auf den Hohlspiegel treffende Wärmestrahlung wird bei der Reflexion parallelgerichtet. Der zweite Hohlspiegel empfängt diese Strahlung und reflektiert sie zu seinem Brennpunkt. Das Schauthermometer wird so angebracht, daß die Thermometerkugel im Brennpunkt des zweiten Hohlspiegels steht.

Die Wärmestrahlung wird durch den angezeigten Temperaturanstieg nachgewiesen.

Noch eindrucksvoller wird der Versuch, wenn man statt des Thermometers eine Streichholzkippe in den Brennpunkt hält. Diese flammt nach kurzer Zeit auf.

## Variante b

Zum Nachweis der Wärmestrahlung kann statt des Thermometers ein Thermistor verwendet werden (Abb. 4.3.1./2). Diese Meßmethode hat den Vorteil, daß auch die entfernt sitzenden Schüler die Temperaturänderung gut erkennen können.

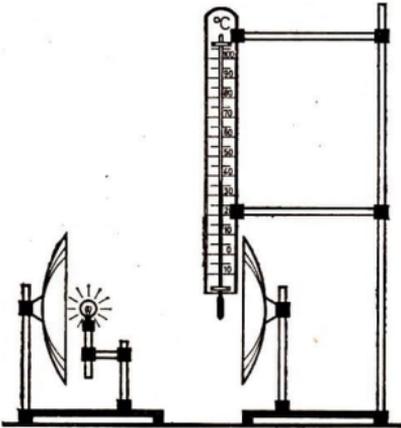


Abb. 4.3.1./1 Reflexion der Wärmestrahlung an Hohlspiegeln

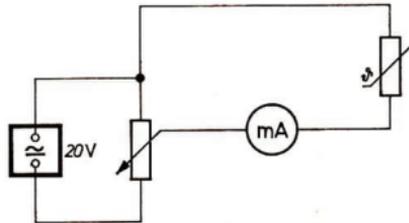


Abb. 4.3.1./2 Temperaturmessung mit einem Thermistor

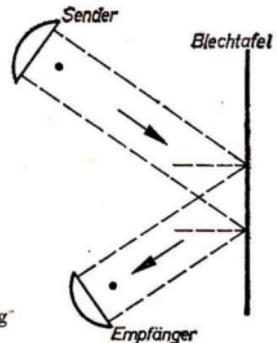


Abb. 4.3.1./3 Reflexion der Wärmestrahlung an einem ebenen Spiegel

*Versuch 2*

Die Hohlspiegel können so angeordnet werden, daß eine Reflexion der Wärmestrahlung an einer Blechwand nachgewiesen werden kann (Abb. 4.3.1./3). Der Nachweis erfolgt mit einem Thermistor.

*Bemerkungen*

1. Der Kaltwiderstand des Thermistors muß groß gegenüber dem Innenwiderstand des Strommessers sein.
2. Steht kein Thermistor der TNM-Reihe zur Verfügung, so kann man sich mit dem Thermistor aus dem SEG Elektrik behelfen. Dieser gehört zur TNA-Reihe, besitzt eine größere Masse und bewirkt dadurch eine träge Anzeige.
3. Vor Beginn der Messung ist die Spannung am Stromversorgungsgerät so einzustellen, daß eine Stromstärke von 0,5 mA bis 1 mA angezeigt wird. Bei Erwärmung des Thermistors steigt die Stromstärke entsprechend an.

**4.3.2. Absorptionsvermögen schwarzer Körper für Wärmestrahlung**

1. 2 Thermometer (0 °C bis 100 °C)
2. schwarzer Lack (Nitrolack oder Ofenlack)
3. 2 einfach durchbohrte Gummistopfen
4. Infrarotstrahler mit Halterung

*Methodischer Hinweis*

Dieses Demonstrationsexperiment eignet sich dazu, die Schüler auf die Gefahren beim Umgang mit Wärmestrahlungsgeräten im Haushalt aufmerksam zu machen. Leicht entzündliche Stoffe (Holz, Pappe, Papier, Textilien) sind aus dem Bereich des Strahlers zu entfernen.

*Versuch*

Der Quecksilberbehälter des einen Thermometers wird mit Lack schwarz gefärbt. Beide Thermometer werden nach Abbildung 4.3.2./1 mit Hilfe der Gummistopfen in horizontaler Lage am Stativ befestigt und der Strahlung des Infrarotstrahlers ausgesetzt. Nach kurzer Zeit ist festzustellen, daß das geschwärzte Thermometer eine höhere Temperatur anzeigt als das ungeschwärzte.

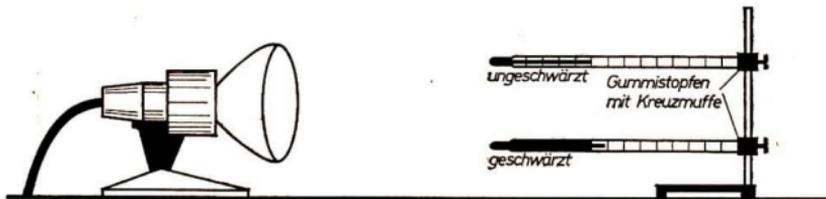


Abb. 4.3.2./1 Absorptionsvermögen schwarzer Körper

*Bemerkungen*

1. Der günstigste Abstand zum Infrarotstrahler ist auszuprobieren, damit kein Thermometer durch zu hohe Temperatur zerstört wird.

2. Statt den Quecksilberbehälter des Thermometers mit Lack zu schwärzen, kann man auch eine Hülle aus schwarzem Papier darüber schieben.
3. Der Versuch kann auch mit Sonnenstrahlen durchgeführt werden.
4. Da der Begriff schwarzer Körper nicht nur in der Optik, sondern auch in der Wärmelehre von Bedeutung ist, sei hier auf eine Veranschaulichung des schwarzen Körpers hingewiesen. Man nimmt eine leichte Pappschachtel, etwa die Verpackungshülle einer Glühlampe oder einer Medikamentenflasche, und faltet sie auseinander. Sämtliche Innenwände streicht man mit schwarzer Spiritusfarbe an, schließt den Boden wieder und schneidet in die Deckfläche ein pfenniggroßes Loch. Man streicht die Schnittkanten und die Außenfläche des Deckels schwarz an. Faltet man nunmehr die Schachtel wieder zusammen, so erscheint das Loch im Deckel in jeder beliebigen Stellung und bei jeder Beleuchtung dunkler als die Umgebung.

### 4.3.3. Experimente mit dem Wärmestrahlungsgerät

1. Wärmestrahlungsgerät komplett, mit Vielfachmanometer
2. Wasserwellen-, Strömungs- und Projektionsgerät WSP 220 oder Tageslichtschreibprojektor mit Zusatzgerät zur Vertikalprojektion

#### Versuch 1

Der Strahler wird mit der mattschwarzen Seite auf die Empfänger mit verschiedenen Oberflächen gerichtet, die sich in der Halterung im gleichen Abstand vor dem Strahler befinden (Abb. 4.3.3./1). Es wird nachgewiesen, daß sich der Empfänger mit der mattschwarzen Fläche am stärksten, der mit der metallisch glänzenden Fläche am wenigsten erwärmt.

Die Temperaturanzeige erfolgt mit Hilfe der Manometerröhren, die in der Projektion für alle Schüler sichtbar gemacht werden.

#### Versuch 2

Der Strahler wird mit den unterschiedlichen Flächen auf die Empfänger gerichtet. Diese werden alle mit der mattschwarzen Seite zum Strahler gekehrt. Es wird nach-

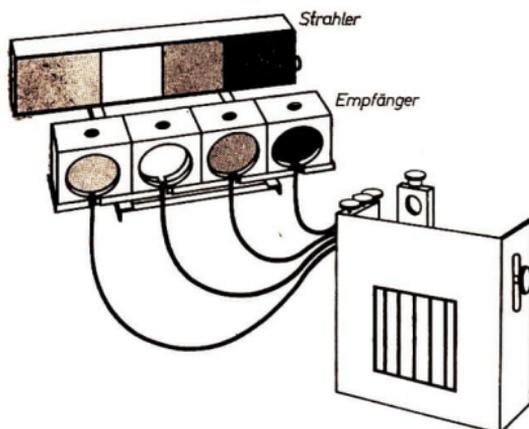


Abb. 4.3.3./1  
Wärmestrahlungsgerät

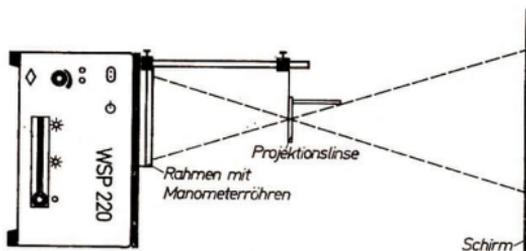


Abb. 4.3.3./2 Projektion der Manometerröhren mit dem WSP 220

gewiesen, daß die mattschwarze Fläche am stärksten und die metallisch glänzende Fläche am wenigsten strahlt.

#### Bemerkungen

1. Beim Strahler können an verschiedenen Stellen seiner Oberfläche unterschiedliche Temperaturen auftreten, besonders dann, wenn eine zu kurze Anheizzeit gewählt wurde. Als Folge davon können unbeabsichtigte Ergebnisse auftreten. Besonders kritisch ist die Anzeige zwischen mattschwarz und schwarz glänzend.
2. Die Manometerröhren sind zu entfetten, bevor man sie mit Wasser füllt (z. B. Auswaschen mit Spiritus). Zeigen sie dennoch nicht alle die gleiche Nullstellung an, so kann es daran liegen, daß sie verschiedene Durchmesser haben (Kapillarwirkung). In diesem Falle muß man sie auswechseln.
3. Zur Projektion der Manometerröhren ist das WSP 220 vorgesehen, das zu diesem Zwecke hochkant gestellt wird (Abb. 4.3.3./2). Steht das WSP 220 nicht zur Verfügung, kann der Tageslichtschreibprojektor mit Zusatzgerät eingesetzt werden.
4. Wegen der Trägheit der Anzeige ist ein Versuch zum Entfernungsgesetz mit diesem Gerät nicht möglich.

### 4.3.4. Experimente mit dem Radiometer

#### Zu Versuch 1

1. Radiometer
2. Infrarotstrahler mit Halterung

#### Zu Versuch 2

- Geräte 1. und 2., außerdem
3. Äther

#### Versuch 1

Fällt Licht oder Wärmestrahlung auf ein Radiometer, so erwärmen sich die schwarzen Flächen des Flügelrades stärker als die blanken Flächen. Prallen nun Gasmoleküle auf die Flügel, so werden sie von den schwarzen Flächen mit einem größeren Impuls reflektiert. Die schwarzen Flächen erfahren einen stärkeren Rückstoß. Das Flügelrad dreht sich mit den blanken Flächen voran (Abb. 4.3.4./1).

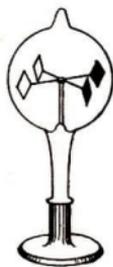


Abb. 4.3.4./1 Radiometer

*Versuch 2*

Auf ein Radiometer wird Äther geträufelt. Seine Verdunstung bewirkt eine starke Abkühlung. Die Flügel setzen sich entgegengesetzt zur üblichen Drehrichtung in Bewegung.

Der Versuch ist auch in der Weise ausführbar, daß man das Radiometer erst ins Sonnenlicht stellt und es dann in den Schatten rückt.

Der Versuch zeigt, daß sich die schwarzen Seiten der Flügel durch Emission stärker abkühlen als die blanken Seiten. Daß so geringe Temperaturdifferenzen, wie sie bei diesem Versuch auftreten, das Radiometer in Bewegung setzen, ist dadurch zu erklären, daß auf die abgekühlte Glaswand alle vier Flügel gleichzeitig strahlen. Wenn dagegen Licht aus einer bevorzugten Richtung auf das Radiometer fällt, ist das resultierende Drehmoment des Flügelrades gleich dem maximalen Drehmoment eines einzigen Flügels.

## 5. Wärmeenergie

### 5.0. Methodische Bemerkungen

**5.0.1.** Die Versuche im Abschnitt 5.1. sollen Beispiele für die Umwandlung von Wärmeenergie in andere Energiearten und von anderen Energiearten in Wärmeenergie zeigen. Hierzu gehören auch die Versuche aus dem Abschnitt 1.2. dieses Buches sowie Versuche aus dem 6. Teil (Elektrizitätslehre I), bei denen elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt wird, sowie Versuche zum Thermoeffekt.

Das pneumatische Feuerzeug ist in seiner Anwendung überholt, und es wird heute nicht mehr um seiner selbst willen im Unterricht behandelt. Doch sprechen Gründe dafür, es experimentell einzusetzen. Das pneumatische Feuerzeug hat Rudolf Diesel als Schüler so stark beeindruckt, daß er dadurch angeregt wurde, die beim Komprimieren des Gases auftretende Wärmeenergie technisch auszunutzen. Tatsächlich läßt sich die Wärmeenergieerzeugung durch Kompression mit keinem Gerät so anschaulich demonstrieren wie mit dem pneumatischen Feuerzeug. Die Whittingsche Röhre ist ebenfalls als historisches Experimentiergerät aufzufassen.

Als Beispiel für die Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie steht der Versuch 5.1.3. Er dient gleichzeitig zur Bestätigung des 1. Hauptsatzes der Wärmelehre.

**5.0.2.** Die Versuche im Abschnitt 5.2. zeigen die physikalischen Grundlagen der Wärmekraftmaschinen. Auf die Vielfalt der technischen Ausführungen kann im Physikunterricht verzichtet werden.

### 5.1. Zusammenhang zwischen Wärmeenergie und anderen Energiearten

#### 5.1.1. Umwandlung mechanischer Energie in Wärmeenergie mit dem pneumatischen Feuerzeug

##### *Zu Variante a*

1. Pneumatisches Feuerzeug
2. mit Äther getränkter Wattebausch
3. Röhrrchen

##### *Zu Variante b*

4. Fahrradluftpumpe
5. Thermistor (Kaltwiderstand 100  $\Omega$  bis 1000  $\Omega$ )
6. Strommesser (Meßbereich 3 mA oder 10 mA)
7. Stromversorgungsgerät (0 bis 20 V—)

*Methodischer Hinweis*

Mit diesem Demonstrationsexperiment kann die Bedeutung der Kompression der Luft im Dieselmotor veranschaulicht werden (adiabatische Kompression).

*Variante a: Erzeugung von Wärmeenergie durch ein pneumatisches Feuerzeug**Vorbemerkung*

Das pneumatische Feuerzeug ist ein dickwandiger Zylinder aus durchsichtigem Material, in dem sich ein gut abdichtender Kolben verschieben läßt (Abb. 5.1.1./1). Erfolgt die Kompression sehr schnell, so ist sie adiabatisch und mit einer beträchtlichen Erwärmung des komprimierten Gases verbunden. Diese Erwärmung kann so groß sein, daß sich der an den Kolben geklemmte Wattebausch entzündet. Man kann die Entzündung begünstigen, wenn man die Kompression in Dämpfen von Schwefelkohlenstoff oder von Äther vor sich gehen läßt, die sich bei 100 °C bzw. bei 180 °C entzünden.

*Versuch*

Von früherer Benutzung her wird häufig noch verbrauchte Luft im Gerät sein. Man führe aus diesem Grunde ein Röhrchen in das Feuerzeug ein und sauge den Luftinhalt heraus; dabei darf man aber nicht etwa Atemluft hineinblasen.

Man benetze den Wattebausch, den man in den Kopf des Kolbens klemmt, mit Äther. Danach lasse man reichlich Zeit für die Verdunstung und die Durchmischung im Zylinder. Nunmehr drückt man kräftig den Kolben herunter, und zwar genau axial, senkrecht zur Tischplatte, damit sich die Führungsstange nicht seitlich verbiegt.

Der Feuerschein beim Entzünden ist deutlich zu sehen.

*Variante b: Erzeugung von Wärmeenergie durch eine Fahrradluftpumpe*

Der Versuch mit dem pneumatischen Feuerzeug kann in abgewandelter Form mit einer Fahrradluftpumpe durchgeführt werden. Dazu wird die Gummidichtung am Luftaustritt der Pumpe abgeschraubt. Durch die Öffnung wird der Thermistor in die Pumpe eingeführt. Man achte darauf, daß die Isolierung der herausgeführten Leitungsdrähte nicht beschädigt wird. Die Stromstärke durch den Thermistor wird vor dem Versuch auf 0,5 mA bis 1 mA eingestellt. Danach verschließt man die Öffnung der Pumpe mit einem Gummistopfen oder einfach mit dem Daumen und pumpt einige Male kräftig. Die Erwärmung wird vom Strommesser angezeigt.

*Bemerkung*

Bei den neueren pneumatischen Feuerzeugen besteht der Zylinder aus einem organischen Glas. Man achte darauf, daß Schwefelkohlenstoff oder Äther nicht in den Zylinder tropft. Er könnte dadurch unbrauchbar werden. Die Verwendung von Fahrradöl ist ebenfalls nicht zu empfehlen.

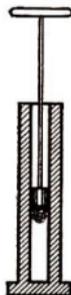


Abb. 5.1.1./1  
Pneumatisches Feuerzeug

## 5.1.2. Umwandlung mechanischer Energie in Wärmeenergie mit der Whitingschen Röhre

1. Whitingsche Röhre
2. Blechgefäß
3. Thermometer (0 °C bis 100 °C)
4. 2 kg Bleischrot
5. Schaumgummi

### Versuch

Man verwendet eine etwa 1 m lange und 6 cm weite Röhre aus Pappe oder Preßspan, die an den beiden Enden durch zwei große Korkstopfen fest verschlossen ist. In der Röhre befinden sich etwa 2 kg feinen Bleischrots, das man durch wechselweises Drehen um 180° über die ganze Rohrlänge herabstürzen läßt (Abb. 5.1.2./1).

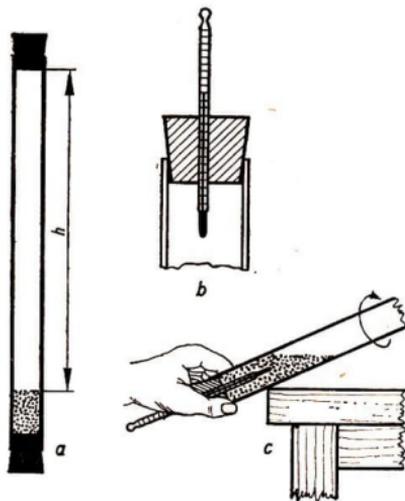


Abb. 5.1.2./1  
Whitingsche Röhre

Man schüttet das Schrot in ein Blechgefäß und kühlt es in diesem auf etwa 2 K bis 3 K unter die Zimmertemperatur ab, damit die Temperatur des Bleischrots während des Versuches nur wenig über Zimmertemperatur ansteigt und die Abgabe von Wärmeenergie an die Umgebung gering gehalten wird. Dann schüttet man es in die Röhre zurück. Danach wird die Temperatur des Bleischrots gemessen, nachdem der Stopfen am oberen Ende der Röhre gegen einen anderen vertauscht wurde, der in einer engen Bohrung ein Thermometer enthält. Man kehrt die Röhre vorsichtig um, so daß das Schrot langsam nach unten rollt und das Thermometer allseitig umgibt. Dabei wird die Pappöhre schräg gegen die Tischkante gestützt und die Röhre langsam um ihre Achse gedreht, damit das Thermometer mit möglichst vielen Schrotkugeln in Berührung kommt. Es vergehen etwa 2 bis 3 Minuten, ehe das Temperaturgleichgewicht eintritt.

Nach der Temperaturmessung wird der Stopfen mit Thermometer wieder durch den ursprünglichen ersetzt. Man dreht die Röhre etwa 50- bis 100mal um eine waagerechte Achse, so daß die Lage der Röhre immer zwischen zwei senkrechten Stel-

lungen wechselt. Dabei wird die Röhre in der Mitte angefaßt und jedesmal auf den Tisch gesetzt, ohne sie jedoch aufzustoßen. Als Unterlage dient ein genügend großes Stück Schaumgummi. Die Pappröhre kann auch mit einem Glasröhrenhalter drehbar an einem Stativ befestigt werden, so daß das Umkehren schneller und einfacher erfolgt. Danach wechselt man wieder einen Stopfen aus und mißt die Temperatur der Schrotkugeln.

### 5.1.3. Experiment zur Bestätigung des 1. Hauptsatzes der Wärmelehre

Zu Variante a

1.  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät

Zu Variante b

2. Kolbenprober (50 ml)
3. Hakenkörper (50 g)
4. Dreiweghahn
5. Laborschlauch
6. Gummistopfen, durchbohrt
7. Erlenmeyerkolben (500 ml)
8. pneumatische Wanne
9. Thermometer (0 °C bis 100 °C)

*Methodischer Hinweis*

Die Variante b, die für den Fall, daß das  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät nicht zur Verfügung steht, angeboten wird, bietet gegenüber der Variante a methodische Vorteile, da Versuchsaufbau und -durchführung sehr übersichtlich sind. Dafür sind die Meßwerte bei Variante a genauer.

*Variante a: Benutzung des  $p$ - $V$ - $T$ -Gerätes*

Mit dem  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät (Abb. 5.1.3./1) wird eine isobare Zustandsänderung durchgeführt (vgl. V 2.3.4., Versuch 3). Die Meßwerte werden zur Bestätigung in die Gleichung für den ersten Hauptsatz der Wärmelehre eingesetzt, der dazu in folgender Form geschrieben wird:

$$W_w = \Delta W_1 + W_m ;$$

$$m \cdot c_p \cdot \Delta T = m \cdot c_v \cdot \Delta T + p \cdot \Delta V .$$

Es bedeuten:

- $m$  — Masse der abgeschlossenen Luftmenge (vor dem Versuch berechnen!)
- $c_p$  — spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck  
(für Luft 1,003 kJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>)
- $c_v$  — spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen  
(für Luft 0,715 kJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>)
- $p$  — der zur Zeit des Versuchs herrschende Luftdruck

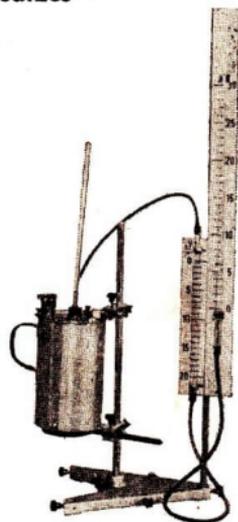


Abb. 5.1.3./1  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät

$\Delta T$  – Temperaturänderung der abgeschlossenen Luftmenge (am Gerät ablesbar)  
 $\Delta V$  – Volumenänderung der abgeschlossenen Luftmenge (am Gerät ablesbar)

Vor und nach der Erhöhung der Temperatur muß der offene Schenkel so eingestellt werden, daß das Wasser in beiden Schenkeln auf gleicher Höhe steht.

*Beispiel für eine Messung (vgl. Tabelle zu V 2. 3. 4., Versuch 3)*

*Gegeben:*

$$V = 1 \text{ dm}^3$$

$$\rho = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$$

$$c_p = 1,003 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$c_v = 0,715 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\Delta T = 2,8 \text{ K}$$

$$p = 1 \text{ at} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Nm}^{-2}$$

$$\Delta V = 10 \text{ cm}^{-3}$$

*Lösung:*

$$m = V \cdot \rho$$

$$m = 1 \text{ dm}^3 \cdot 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ kg dm}^{-3}$$

$$m = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$m \cdot c_p \cdot \Delta T = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 1,003 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot 2,8 \text{ K}$$

$$m \cdot c_p \cdot \Delta T \approx 3,6 \text{ J}$$

$$m \cdot c_v \cdot \Delta T = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 0,715 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1} \cdot 2,8 \text{ K}$$

$$m \cdot c_v \cdot \Delta T \approx 2,6 \text{ J}$$

$$p \cdot \Delta V = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Nm}^{-2} \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$p \cdot \Delta V \approx 1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$$

*Bestätigung des 1. Hauptsatzes;*

$$m \cdot c_p \cdot \Delta T = m \cdot c_v \cdot \Delta T + p \cdot \Delta V$$

$$\underline{3,6 \text{ J} = 2,6 \text{ J} + 1 \text{ J}}$$

*Variante b; Benutzung eines Kolbenprobers*

Steht kein  $p$ - $V$ - $T$ -Gerät zur Verfügung, so kann der Versuch mit einem Aufbau nach Abbildung 5.1.3./2 durchgeführt werden. Der Kolben des Kolbenprobers, auf dem mit Draht ein Hakenkörper befestigt wurde, wird bei Stellung 1 des Dreiweghahnes (Abb. 5.1.3./3) eingesetzt. Durch vorsichtiges Drehen des Hahnes nach Stellung 2 läßt man den Kolben bis zur Ausgangsstellung absinken. Danach wird der Dreiweghahn wieder in Stellung 1 gebracht. Gießt man nun Wasser mit einer Temperatur von etwa  $50^\circ\text{C}$  in die pneumatische Wanne, bis der Erlenmeyerkolben völlig bedeckt ist, so findet eine isobare Zustandänderung der eingeschlossenen Luft statt. Die Auswertung erfolgt wie bei Variante a. Das Volumen der abgeschlossenen Luftmenge bestimmt man längere Zeit vor dem Versuch, indem die Apparatur bis zur Ausgangsstellung des Kolbens mit Wasser gefüllt und danach das Volumen des

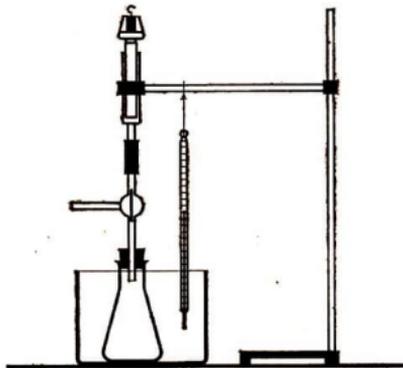


Abb. 5.1.3./2 Bestätigung des 1. Hauptsatzes mit Hilfe eines Kolbenprobers

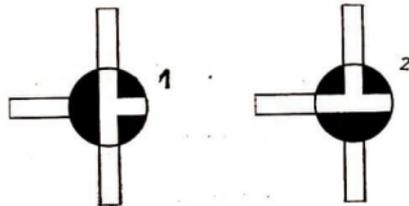


Abb. 5.1.3./3 Verwendete Stellungen des Dreiweghahnes

Wassers gemessen wird. Daraus läßt sich die Masse der abgeschlossenen Luftmenge berechnen. Beim Versuch muß die Apparatur innen wieder vollkommen trocken sein, da andernfalls der Dampfdruck des Wassers die Meßergebnisse stark beeinflußt.

Die Volumenänderung wird am Kolbenprober abgelesen.

Der konstant gehaltene Druck ist die Summe aus dem äußeren Luftdruck und dem Druck, der durch die Gewichtskraft des Kolbens mit dem Hakenkörper erzeugt wird. Letzterer muß mit Hilfe der Querschnittsfläche des Kolbens berechnet werden.  $\Delta T$  ist die Differenz zwischen der Temperatur des Wassers und der Zimmertemperatur.

#### Bemerkungen

1. Benetzt man den Kolben mit Wasser oder Paraffinöl, so erreicht man eine bessere Abdichtung und verringert die Reibung.
2. Das Versuchsergebnis ist ungenau, weil der Kolben nie völlig dicht ist und ein Teil der eingeschlossenen Luft allmählich entweicht. Deshalb darf man mit dem Ablesen der Volumenänderung nicht zu lange warten.

## 5.1.4. Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie

1. Einfache Thermosäule
2. Bunsenbrenner
3. Drehspulmeßgerät (Meßbereich 3 mA; 30 mV)
4. pneumatische Wanne

#### Versuch

Die Thermosäule wird nach Abbildung 5.1.4./1 aufgebaut. Während die vorderen Lötstellen mit dem Bunsenbrenner erwärmt werden, sind die hinteren mit Wasser zu kühlen. Das Meßgerät zeigt die durch seinen Eigenwiderstand und den der

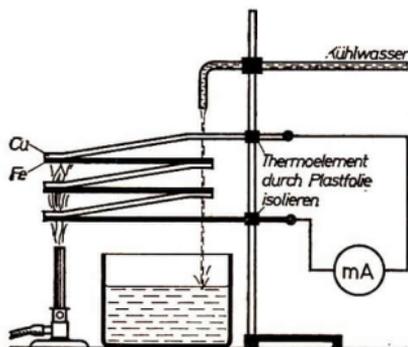


Abb. 5.1.4./1 Einfache Thermosäule zum Nachweis der Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie

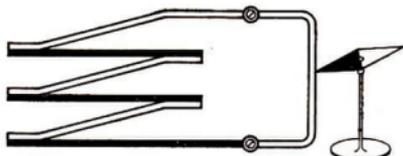


Abb. 5.1.4./2 Nachweis des Thermostromes mit Hilfe einer Magnetnadel

Thermosäule begrenzte Stromstärke an. Sind diese beiden Widerstände hinreichend klein, können trotz der geringen Thermospannung große Stromstärken auftreten.

*Bemerkungen*

1. Grundsätzlich können die Versuche 5.3.11. bis 5.3.13. aus dem 9. Teil (Elektrizitätslehre II) zum Nachweis der Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie gezeigt werden.
2. Da nicht immer Konstantan zur Anfertigung der Thermoelemente zur Verfügung steht, wird hier eine dreistufige Thermosäule aus Kupfer und Eisen verwendet. Theoretisch liefert sie bei einem Temperaturunterschied von 500 K zwischen den Lötstellen eine Thermospannung von etwa 15 mV.  
Verwendet man für die Thermosäule Kupfer- und Eisendrähte mit möglichst großem Querschnitt, so wird ihr Widerstand gegenüber dem Innenwiderstand des Meßgerätes vernachlässigbar klein. Die angezeigte Stromstärke hängt dann praktisch nur vom Innenwiderstand des Meßgerätes ab ( $R_1 = 10 \Omega$ ). Man ist daher nicht auf ein Spiegelgalvanometer angewiesen.
3. Schließt man die Thermosäule mit einem Kabel kurz (Abb. 5.1.4./2), so kann man gegebenenfalls den Thermostrom durch die Ablenkung einer Magnetnadel nachweisen.

## 5.2. Wärmekraftmaschinen

### 5.2.1. Modellexperiment zur atmosphärischen Dampfmaschine ⑧

*Zu Versuch 1*

1. Papinischer Dampfzylinder
2. Bunsenbrenner
3. flache Glasschale
4. Brett (250 mm × 100 mm)
5. 2 Rundhölzer
6. Pipette

*Zu Versuch 2*

- Geräte 1. bis 6., außerdem
7. Kugellagerwelle
  8. 3 Hakenkörper (50 g)
  9. Standzylinder (300 mm)
  10. Holzleiste (200 mm × 30 mm × 5 mm)
  11. 2 Kreissegmente aus Holz (150 mm × 30 mm)

*Versuch 1*

Im Papinschen Dampfzylinder (Abb. 5.2.1./1) hebt der Dampf den Kolben gegen den Luftdruck und die Gewichtskraft empor. Soll der Kolben durch den Luftdruck in den Zylinder zurückgedrückt werden, so muß durch Niederschlagen des Dampfes ein Unterdruck im Zylinder geschaffen werden. Dazu stellt man den Bunsenbrenner und eine flache Glasschale auf ein Brett, das auf zwei Rundhölzern liegt. Dadurch läßt sich der Bunsenbrenner leicht unter dem Zylinder verschieben. Hat sich der Kolben gehoben, so verschiebt man das Brett so weit, daß die Glasschale unter dem Zylinder steht. Mit der anderen Hand läßt man aus einer Pipette, die man gegen einen Plastilinwulst an der Dampfaustrittsöffnung stützt, einige Tropfen Wasser in diese laufen. Das kalte Wasser gelangt in den Zylinder, und der Dampf kondensiert.

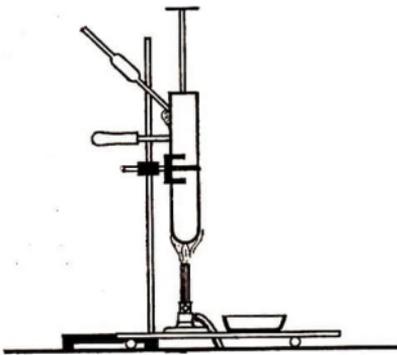


Abb. 5.2.1./1 Modell des Papinschen Dampfzylinders

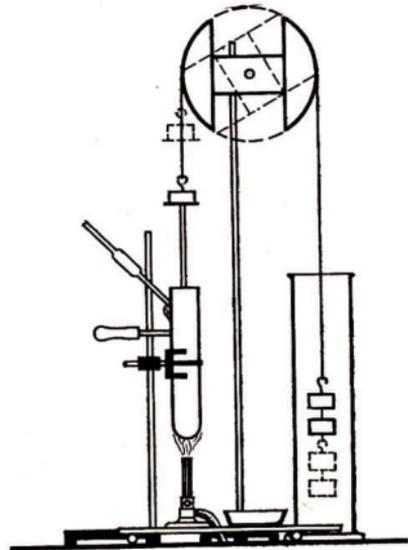


Abb. 5.2.1./2 Modell der Newcomenschen Dampfmaschine

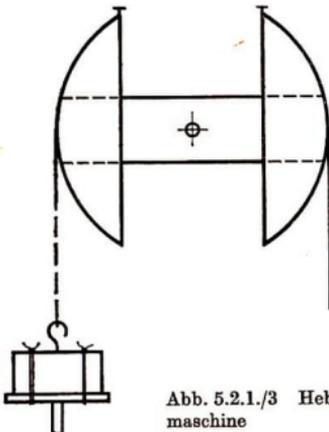


Abb. 5.2.1./3 Hebelwerkmodell der Newcomenschen Dampfmaschine

Dadurch entsteht ein luftverdünnter Raum; der Kolben wird vom äußeren Luftdruck in den Zylinder gedrückt. Man verschiebt das Brett so, daß der Bunsenbrenner wieder unter dem Zylinder steht. Schon nach kurzer Zeit hat sich wieder so viel Dampf entwickelt, daß der Kolben erneut gehoben wird. Der Vorgang wiederholt sich.

### Versuch 2

Die vorstehende Anordnung läßt sich zu einem Modell einer Newcomenschen Dampfmaschine umändern (Abb. 5.2.1./2). Eine passende Leiste wird im Mittelpunkt durchbohrt, so daß sie sich auf eine Kugellagerachse aufstecken läßt. An den beiden Enden der Leiste befestigt man zwei Kreissegmente (Abb. 5.2.1./3). Die Länge der Kreisbögen muß gleich dem Kolbenhub sein. Der Kreismittelpunkt ist die Bohrung in der Leiste. Diese Vorrichtung ergänzt die oben beschriebene Versuchsanordnung zum Papinschen Dampfzylinder. Auf dem Teller des Kolbenschaftes bindet man einen Hakenkörper mit Draht fest. An diesen knüpft man einen Faden, dessen anderes Ende mit einer Reißzwecke an dem einen Kreissegment befestigt ist. Am anderen Kreissegment wird ebenfalls ein Faden befestigt, an dessen Ende zwei Hakenkörper hängen. Darunter stellt man einen Standzylinder, der ein Pumpenrohr veranschaulichen soll.

Die Durchführung des Versuches erfolgt wie bei Versuch 1. Dabei werden die den Pumpenkolben darstellenden Hakenkörper gehoben und gesenkt. Das Heben des Pumpenkolbens und damit das Verrichten der Arbeit erfolgt durch den atmosphärischen Luftdruck.

### Bemerkungen

1. Die ersten atmosphärischen Dampfmaschinen wurden in ähnlicher Form von Hand gesteuert. Das Modell entspricht einer Vorrichtung, wie sie in England zum Auspumpen der Bergwerke Anwendung fand.
2. Stehen Schnittmodelle verschiedener Dampfmaschinen zur Verfügung, kann man daran die technische Weiterentwicklung demonstrieren.

## 5.2.2. Modellexperiment zur Dampfturbine ⑧

1. Blechscheibe ( $\varnothing$  150 mm)
2. Holzscheibe ( $\varnothing$  90 mm; Dicke 10 mm)
3. Rundholz mit gerundeter Stirnfläche (10 mm)
4. glatter, runder Nagel
5. Bunsenbrenner mit Dreifuß und Drahtgewebe mit Asbest
6. Erlenmeyerkolben
7. zweifach durchbohrter Stopfen
8. 2 gewinkelte Glasröhren mit Spitzen

### Lavalrad-Modell aus einer Blechscheibe

Das Turbinenrad-Modell wird nach Abbildung 5.2.2./1 auf ein dünnes Stück Blech gezeichnet und ausgeschnitten. Nachdem alle Linien bis zum inneren Kreis eingeschnitten sind, werden die schraffierten Flächen um etwa  $50^\circ$  nach hinten weggebogen und mit einer Rundzange gekrümmt. Auf der Rückseite wird eine 10 mm dicke Holzscheibe auf die Blechscheibe aufgesetzt und festgenagelt. Die inneren Kanten der umgebogenen Flächen schließen mit dem Rande der Holzscheibe ab (Abb.

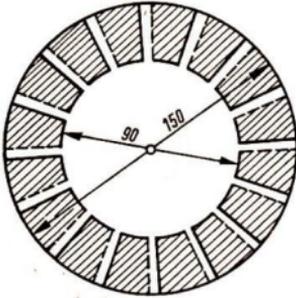


Abb. 5.2.2./1 Herstellen eines Lavalrad-Modells aus einer Blechscheibe



Abb. 5.2.2./2 Seitenansicht des Lavalrad-Modells mit gekrümmten Flügeln

5.2.2./2). Im Mittelpunkt wird eine Bohrung angebracht, durch die ein glatter, runder Nagel paßt. Er wird als Achse in die Stirnseite eines Rundholzes getrieben, das an der Stirnfläche abgerundet ist, so daß sich die Blechscheibe leicht drehen kann.

#### Versuch

In den Verschlussstopfen eines Erlenmeyerkolbens setzt man die gewinkelten, mit Spitzen versehenen Glasröhren ein. Die Spitzen sind entgegengesetzt zueinander schräg nach oben beziehungsweise nach unten umgebogen. Der Erlenmeyerkolben wird mit etwas Wasser gefüllt und über einem Bunsenbrenner erwärmt. Wenn das Wasser siedet, entströmt den Düsen je ein Dampfstrahl. Die Dampfstrahlen treffen schräg auf die Schaufeln und bringen das Rad zum Drehen (Abb. 5.2.2./3).

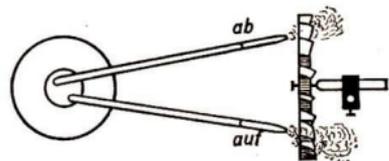
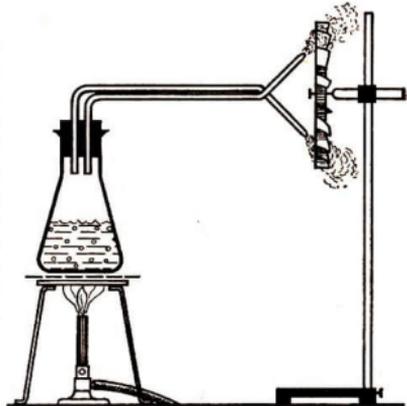


Abb. 5.2.2./3 Aufstellen des Lavalrad-Modells vor einem Erlenmeyerkolben. Darunter der Grundriß

**5.2.3. Modellexperiment zum Verbrennungsmotor***Zu Variante a*

1. Gerät zur Demonstration der Explosion eines Gas-Luft-Gemisches im Verbrennungsmotor
2. Funkeninduktor
3. Benzin
4. Zerstäuber

*Zu Variante b*

Geräte 2. bis 4., außerdem

5. Müllersche Gasmeßglocke
6. großer Wattebausch
7. 2 Bananensteckerbuchsen
8. Stricknadel
9. Gummistopfen
10. Glas- oder Piacrilscheibe (etwa 500 mm × 500 mm × 10 mm)

*Variante a*

Man öffnet den Belüftungshahn des Gerätes (Abb. 5.2.3./1) oder schraubt die Zündkerze heraus und bewegt den Kolben einige Male auf und ab, um Frischluft in den Zylinder zu bringen. Danach schließt man den Funkeninduktor an die Anschlüsse

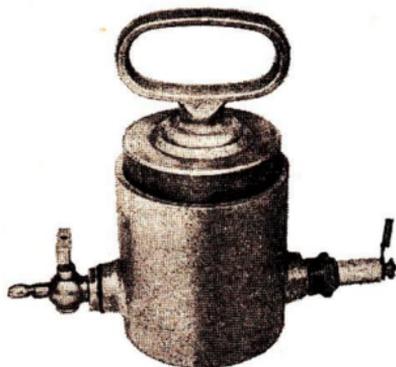


Abb. 5.2.3./1 Gerät zur Demonstration der Explosion eines Gas-Luft-Gemisches im Verbrennungsmotor

der Zündkerze an, die in den Zylinder hineinragt. Durch kurzzeitiges Einschalten des Funkeninduktors ist zu überprüfen, ob an der Zündkerze ein kräftiger Funke überspringt. Gegebenenfalls ist der Funkeninduktor nachzuregulieren.

Man sprüht nun etwas Benzin in den Zylinder, möglichst nicht auf die Zündkerze. Der Kolben wird eingesetzt und heruntergedrückt, der Belüftungshahn wieder geschlossen.

Schaltet man nun den Funkeninduktor kurzzeitig ein, so wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch entzündet und der Kolben ein Stück nach oben getrieben.

*Variante b*

Eine Gasmeßglocke wird mit der engen Öffnung nach unten an einem Stativ befestigt (Abb. 5.2.3./2). Durch einen in den engen Hals der Gasmeßglocke passenden Gummistopfen steckt man zwei Stricknadelstücke und biegt die Enden so weit nach innen, daß ihr Abstand etwa 2 mm beträgt. An die beiden äußeren Enden schraubt

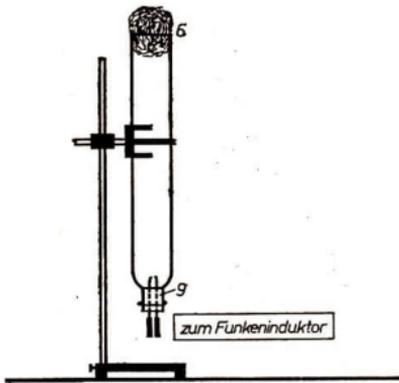


Abb. 5.2.3./2 Anordnung des Modell-experimentes zum Verbrennungsmotor

man zwei Bananensteckerbuchsen für den Anschluß des Funkeninduktors an. Damit Unfälle vermieden werden, ist die Versuchsanordnung gegen die Schüler durch eine Schutzscheibe abzuschirmen.

Vor Versuchsbeginn erwärmt man die Gasmeßglocke etwas. Mit Hilfe einer Pipette bringt man einige Tropfen Benzin so in die Glocke, daß sie an den Wänden herunterlaufen. Noch besser ist es, mittels eines Zerstäubers die gleiche Menge einzusprühen. Dann verschließt man die Gasmeßglocke durch einen den Kolben veranschaulichenden Wattebausch. Wird nun der Funkeninduktor eingeschaltet, so springt zwischen den Drahtenden ein Funke über und bringt das Kraftstoff-Luft-Gemisch zur Entzündung. Der Wattebausch, den man nicht fest andrücken darf, wird dadurch herausgeschleudert. Beim ersten Versuch bedarf es meist mehrerer Zündungen. Nach jedem Versuch bläst man schräg über den Rand in die Glocke, wodurch man die Verbrennungsgase absaugt und Frischluft zuführt.

*Bemerkung*

Die erforderlichen Vorsichtsmaßregeln sind genau zu beachten. Insbesondere prüfe man die Gasmeßglocke genau auf etwa vorhandene Sprünge und verwende außerdem eine dicke Glasschutzscheibe oder ein Drahtschutznetz. Der Lehrer selbst tritt möglichst weit zurück und benutzt eine Schutzbrille.

# Register

- Abdampfschale 102  
Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Druck 20f., 87  
Abkühlung 119f., 151  
– beim Verdunsten 120  
Ableseübungen 17f.  
Absorptionsvermögen 148  
adiabatische Kompression 153  
Aggregatzustand 14, 48  
– Änderungen des 14  
Aneroidbarometer 83  
Anomalie des Wassers 49, 64  
Arbeits- und Brandschutz 12, 14  
atmosphärische Dampfmaschine 158, 160  
Ausdehnung 60, 64  
– von Flüssigkeiten 64  
– von Gasen 71, 77, 81  
Gerät zur Demonstration der ... der Körper 60  
Ausdehnungskoeffizient 49, 61, 66, 71, 77, 79, 81  
– linearer 12, 61  
– kubischer 66  
automatischer Feuermelder 58
- behelfsmäßiges Kalorimeter 15, 41, 108  
Bimetallschalter 59  
Bimetallstreifen 14, 48, 57ff.  
Boylesches Gesetz 74  
Brennpunkt 147  
Bunsenbrenner 11
- Dampf 115f., 122f., 126, 130  
– überhitzter 130  
Dampfblasen 111  
Dampfdruck des Wassers 157  
Dampfmaschine 87, 158ff.  
– atmosphärische 158, 160  
– Newcomensche 159f.  
– Kondensator einer 87
- Dampfturbine 131, 160  
Dampfzylinder, Papinscher 158ff.  
Dehnungsausgleicher 48, 56  
Destillat 114, 133  
Destillation 133  
Destillationsanlage 114  
Destillationsgeschwindigkeit 133  
Destillationskühler 114  
Destillieren 87, 113f., 131f.  
– Modellexperiment zum 133  
Dewargefäß 15, 42  
Doppelthermoskop, Loosersches 87, 96f., 104ff.  
Drehschlange 144  
Druck 12  
Druckabhängigkeit der Siedetemperatur 128f.  
Druckerniedrigung 127
- Eis 91, 93, 109  
– Schmelzen von 91  
– spezifische Schmelzwärme von 93  
– Regeneration des 109  
Eisbildung beim Verdunsten 119  
elektrische Temperaturmessung 104  
elektrische Wärmequellen 11  
Energie 12, 14  
– innere 12  
– Wärme ... 14  
Erstarren 14, 86f., 96, 103f.  
Erstarrungstemperatur 86ff., 108f.  
erster Hauptsatz der Wärmelehre 152, 155ff.
- Festfrieren eines Uhrglases 119  
Feuerbohrer 26  
Feuermelder, automatischer 58  
Feuerzeug, pneumatisches 152 f.  
Fieberthermometer 22  
Fixpunkt 13, 18f.  
Flüssigkeit 63 f., 87  
– Ausdehnung von 63 f.

- reale 87
- Formveränderung 53, 54
  - von Glas 53
  - von Gummi 54
  - von Plasten 54
- Gastheorie, Gerät zur kinetischen 9, 49, 77, 87, 131f.
- Gefrierbombe 98
- Geiser 128
- Gerät
  - nach Wildermuth 25
  - zur Bestimmung des linearen Ausdehnungskoeffizienten 61
  - zur Demonstration der Ausdehnung der Körper 60
  - zur Demonstration der Explosion eines Gas-Luft-Gemisches im Verbrennungsmotor 162
  - zur Demonstration der Wärmeleitfähigkeit 136f.
  - zur kinetischen Gastheorie 9, 49, 77, 87, 131f.
- Geschwindigkeit der Verdunstung 117
- Gesetz, Boylesches 74
- Gießen 86, 99f.
  - Modellversuch zum 100
- Glas, Formveränderung von 53
- Gleichung für die Wärmemenge 14, 29
- Gummi, Formveränderung von 54
- H**
  - Höchsttemperatur 21
  - Hohlspiegel, sphärischer 146ff.
- ideales Gas 489, 71
  - Zustandsgleichung des 49, 71
- Implosion 127
- Infrarotstrahler 70, 148, 150
- innere Energie 12
- Internationales Einheitensystem 12
- isobare Zustandsänderung 74, 80, 155f.
- isochore Zustandsänderung 73
- J**
  - Joule 12
- K**
  - Kalibrieren 63, 66f. 79
  - Kalorimeter 15, 41, 93, 108f., 122ff., 139
    - behelfsmäßiges 15, 41, 93, 108, 124
    - Wärmekapazität des 93, 123
  - Kältemischung 87, 98, 103f., 108f., 120
  - Kelvin 12
  - Kesselexplosion 129
  - Kilopascal 12
  - Knallkugel 129f.
- Koeffizienten 71, 77
  - Ausdehnungs ... von Gasen 71, 76f.
  - kubischer Ausdehnungs ... 66
  - linearer Ausdehnungs ... 12, 61f.
  - Spannungs ... von Gasen 71, 76f.
- Kohlendioxid 101, 103, 109
  - schnee 101f., 109
  - stahlflasche 101
- Kolbendampfmaschine 131
- Kolbenluftpumpe 125
- Kolbenprober 125f.
- Kompression 153
  - adiabatische 153
- Kondensation 110, 113
  - Kondensationswärme 122f.
  - spezifische 122f.
- Kondensator einer Dampfmaschine 87
- Kondensieren 14, 86, 100, 110ff., 115, 122f., 126
  - kondensierter Wasserdampf 111, 120
- Kondenswasser 111, 113, 115, 122f.
- Kontraktionsapparat nach Tyndall 55f.
- Körper, schwarzer 148f.
- Kraftstoff-Luft-Gemisch 162f.
- Kraftwirkung 55
- Kristallisation 107
- Kristallisationswärme 106f.
- Kristallisieren 86, 104
- Kristallwasser 106
- Kryophor 118, 120
- kubischer Ausdehnungskoeffizient 66
- Kugel-Ring-Versuch 52
- Kühler 114f.
  - Destillations ... 114
  - Schlangen ... 115
- L**
  - Langbrenner für Stadtgas 37ff.
  - Lavalrad-Modell 160f.
  - Legierung 90f.
  - linearer Ausdehnungskoeffizient 61f., 12
    - Gerät zur Bestimmung des 61
    - von Messing 62
  - Loosersches Doppelthermoskop 87, 96f., 104ff.
  - Lösen 86, 104
  - Lösungswärme 104f.
  - Luft 68, 143
    - strömung 143
    - Volumenänderung von 68
  - Luftströmung 143
    - über Wärmequellen 143
- M**
  - Manometer, 82
    - offenes 82

- Maximum- und Minimumthermometer nach Six 21f.  
 mechanisches Wärmeäquivalent 25  
 Messing 45, 62  
   — linearer Ausdehnungskoeffizient 42  
   — spezifische Wärmekapazität 45  
 Meßkolben 66f.  
 Meßuhr 61  
 Meßwertwandlung 13  
 Metalle 50ff.  
   — Volumenänderung von 50ff.  
 Mischkalorimeter 93  
 Mischungstemperatur 41, 44f., 46  
 Modellexperiment 100, 132, 133  
   — zum Destillieren 133  
   — zum Gießen 100  
   — zum Sieden 132  
   — zum Verbrennungsmotor 162  
   — zum Verdunsten 132  
 Molekularbewegung 14  
  
 Newcomen'sche Dampfmaschine 159f.  
 Nichtmetall 48, 52  
   — Volumenänderung von 52  
  
 offenes Manometer 82  
  
 Papin'scher Dampfzylinder 158ff.  
 Papin'scher Topf 128f.  
 Plaste 48, 54  
   — Formveränderung von 54  
 pneumatisches Feuerzeug 152f.  
 Projektionsfolien 13, 17  
 Projektionsthermometer 13, 87, 105, 108, 112  
 Propangas 11  
 Prozeßgröße 12  
*p-V-T*-Gerät 9, 12, 49, 71, 155  
  
 Quecksilberdämpfe 103  
  
 Radiometer 134, 150f.  
 Rauhreifbildung 100  
 reale Flüssigkeit 87  
 Reflexion der Wärmestrahlung 146ff.  
 Regolation des Eises 109  
 Reibung 25  
 Reibungseinsatz 26  
 Richmann'sche Mischungsregel 46  
 Rundungsprobleme 12  
  
 Sandbadschale 102  
 Schattenwurf 50, 79, 138  
 Schauthermometer 19, 27, 63f., 125, 146, 147  
 Schlangenkühler 115  
 Schmelzen 14, 86, 87, 91  
   — von Eis 91  
 Schmelzlöffel 90  
 Schmelzpunkt 13, 19f.  
 Schmelztemperatur 13, 86ff., 107, 109, 136  
   — von Natriumthiosulfat 88  
 Schmelzwärme 91, 93ff., 96  
   — spezifische ... des Eises 93ff.  
 Schmelzwasser 86, 93, 96  
 Schnellkochtopf 128  
 Schornsteinmodell 146  
 schwarzer Körper 148f.  
 Selbstbauteile 10  
 SI 12  
 Sieden 110, 113, 121, 122, 124, 125ff., 131f., 139, 140, 141  
   — unter vermindertem Druck 125ff.  
   — unter erhöhtem Druck 128f.  
   — Modellexperiment zum 132  
 Siedepunkt 13, 19f.  
 Siedetemperatur 13, 20, 43, 87, 111f., 119, 125, 126, 128  
   — Abhängigkeit der ... vom Luftdruck 20  
   — des Äthanols 43  
   — des Tetrachlorkohlenstoffs 43  
   — Druckabhängigkeit der 87, 128f.  
 Sinnestäuschung 15f.  
 Skalierung 16  
 Spannungskoeffizient 49, 71, 77, 83, 85  
   — des idealen Gases 71, 77  
 spezifische Kondensationswärme 122f.  
 spezifische Schmelzwärme des Eises 93  
 spezifische Wärme 12  
 spezifische Verdampfungswärme von Wasser 120f.  
 spezifische Wärmekapazität 15, 34, 36f., 42f., 155  
   — bei konstantem Druck 155  
   — bei konstantem Volumen 155  
   — von Brennspirit 43  
   — von Eisen 36f.  
   — von Tetrachlorkohlenstoff 42  
   — von Wasser 34  
 sphärischer Hohlspiegel 146  
 Spirituslampe 11  
 Stahlflasche für Kohlendioxid 101  
 Stativheizplatte 11, 27  
 subjektives Beurteilen von Temperaturen 15  
 Sublimation 100, 103  
 Sublimationswärme 101  
 Sublimieren 14, 86, 100, 103  
   — von Kohlendioxidschnee 103  
  
 Tauchsieder 11, 15  
 Teclubrenner 11  
 Temperatur 13, 15

- Siede ... 13, 20, 43, 87, 111f., 119, 121, 125f.
- Schmelz ... 13, 86ff., 90, 107, 109, 136
- Höchst ... 21
- Tiefst ... 21
- Mischungs ... 44, 46
- Erstarrungs ... 86ff., 108f.
- subjektives Beurteilen von 15
- Temperaturabhängigkeit des Widerstandes 14
- Temperaturgefälle 66
- Temperaturmeßgeräte 13
- Temperaturmessung, elektrische 23, 104
- Temperaturregelung 59
- Temperaturschichtung des Wassers 65
- Thermistor 14, 23, 24, 105, 107, 147f., 153
  - Eigenerwärmung des 24
- Thermoelement 13, 28, 86, 90, 106, 107, 158
- Thermometer 13, 16, 17, 19, 21, 22
  - Fieber ... 22
  - Maximum- und Minimum ... nach Six 21, 22
  - modelle 13, 16, 17
  - Projektions ... 13, 87, 105, 108, 112
  - Schau ... 19, 27, 63, 64, 125, 146f.
- Thermosäule 157, 158
- Thermoskop 87, 96f., 104ff.
- Thermospannung 23, 158
- Thermostrom 158
- Tiefsttemperatur 21
- Torr 12
- Trockeneis 86
- Tyndall, Kontraktionsapparat nach 55f.
- Überhitzen von Wasserdampf 131
- überhitzter Dampf 130
- Uhrglas, Festfrieren eines 119
- Umwandlung von mechanischer Energie in
  - Wärmeenergie 152, 154
  - von Wärmeenergie in elektrische Energie 157, 158
- Unterkühlen 106
- unterkühlte Schmelze 107
- Verbrennung 28
- Verbrennungsmotor 162, 163
- Verdampfen 14, 86, 110, 125
- Verdampfungswärme, spezifische 120f.
- Verdunsten 87, 97, 116, 118, 119, 120, 131, 132, 151
  - Abkühlung beim 120
  - Eisbildung beim 119
  - Geschwindigkeit des ... 116ff.
  - Modellexperiment zum 132
  - Wärmeaufnahme beim 118, 119
- Volumenänderung beim Erwärmen von Wasser 62f.
  - von Luft 68
  - von Metallen 50
  - von Nichtmetallen 52
- Wärme 12
  - spezifische 12
  - und Molekularbewegung 14
- Wärmeäquivalent, mechanisches 25
- Wärmeaufnahme beim Verdunsten 118f.
- Wärmeausbreitung 134, 136
- Wärmeaustausch 86, 116
- Wärmeaustauscher 87, 115
- Wärmedämmung 121
- Wärmeempfindung 13
- Wärmeenergie 14, 152, 154, 157, 158
  - Umwandlung mechanischer Energie in 152, 154
  - Umwandlung von ... in elektrische Energie 157, 158
- Wärmekapazität 12, 15, 29, 32, 34, 36f., 42, 43, 45, 93, 121, 123, 124
  - eines Dewar-Gefäßes 43
  - eines Kalorimetergefäßes aus Metall 45, 93
  - spezifische 15, 34, 36f., 42f., 155
  - spezifische ... von Wasser 34
  - spezifische ... von Eisen 36f., 41
  - spezifische ... fester Stoffe 41
  - spezifische ... flüssiger Stoffe 42
  - spezifische ... des Tetrachlorkohlenstoffs 42
  - spezifische ... des Brennspiritus 43
  - spezifische ... des Messings 45
- Wärmekraftmaschine 152, 158
- Wärmelehre, 1. Hauptsatz der 152, 155, 157
- Wärmeleistung 125
- Wärmeleiter 139f.
- Wärmeleitfähigkeit 134 ff.
  - der Luft 139
  - des Wassers 138
  - Gerät zur Demonstration der 136, 137
- Wärmeleitung 134, 135
- Wärmemenge 12 ff., 29
  - Gleichung für die 14, 29
- Wärmequellen 11, 13, 14, 25
  - elektrische 11
  - Luftströmung über 143
- Wärmestrahlung 134, 140, 146ff.
  - Reflexion der 146ff.
- Wärmestrahlungsgerät 9, 148, 149
- Wärmeströmung 134, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145
- Wärmeübertragung 134

- Wasser 49, 63, 64, 65, 157
  - Anomalie des 49, 64
  - Dampfdruck des 157
  - Temperaturschichtung des 63
  - Volumenänderung des 63
- Wasserdampf 111, 120
  - kondensierter 111
  - Überhitzen von 131
- Whitingsche Röhre 152, 154
- Widerstand, Temperaturabhängigkeit des 14
- Wildermuth, Gerät nach 24
- Windrädchen 143, 144
- Wirkungsgrad 131
- Zentraluhr 136, 137
- Zirkulationsröhre 142
- Zündkerze 262
- Zustandsänderungen 73, 74
  - isobare 74, 80, 155f
  - isochre 73
- Zustandsgleichung des idealen Gases 49, 71
- Zustandsgröße 12-49

**Quellennachweis der Abbildungen**

Heim, E., Flöha: 1.3.3./1; Seifert, Volk und Wissen, Berlin: 3.4.12./2, 5.1.3./1 und 5.2.3./1