

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 3

Rückblick und Perspektive

ISBN 3 - 7896 - 0513 - 1

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1993

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Im Einmachglas zum absoluten Nullpunkt

1. Einleitung

Die physikalischen Erkenntnisse, daß es eine tiefste Temperatur bei -273°C gibt und wie die Zustandsgrößen p, V, T bei (idealen) Gasen voneinander abhängen, sind unverzichtbar für das Verständnis vieler Naturphänomene. Deshalb gehört der Themenkomplex "Absoluter Nullpunkt und Allgemeine Zustandsgleichung idealer Gase" zum festen Bestandteil von Lehrplänen verschiedener Schularten.

Üblicherweise (siehe z.B. [1], S. 22ff sowie [2] - [8]) beginnt man im Unterricht mit dem

Gesetz von Gay-Lussac: $V/T = \text{const.}$ (falls p konstant ist).

Dabei wird ein beliebiges Luftvolumen mit einem Quecksilbertropfen, der sich in einem Glasrohr leicht bewegen kann, verschlossen und in einem Wasserbad erhitzt ([10], S. 119 Gasthermometer). Die Temperaturerhöhung sorgt für eine Ausdehnung des eingeschlossenen Luftvolumens. Mit Hilfe des Quecksilbertropfens kann die Volumenzunahme an einer Skala abgelesen werden. Der Druck bleibt dabei unverändert, weil das Rohr, das die Luftmenge und den Quecksilbertropfen enthält, offen ist.

Die Auswertung dieses Versuchs zeigt in einem ϑ - V -Diagramm für jedes Luftvolumen V , daß die Meßpunkte näherungsweise auf einer Geraden mit jeweils anderer Steigung liegen. Diese Geraden schneiden sich (mehr oder minder genau) auf der ϑ -Achse bei -273°C . Der Bereich der sehr tiefen Temperaturen wird i.a. nicht genauer betrachtet ([6], S. 146).

An dieser Stelle kann die Absolute Temperatur T eingeführt werden.

Mit dem Gesetz von Gay-Lussac und dem

Gesetz von Boyle-Mariotte: $p \cdot V = \text{const.}$ (falls T konstant ist)

erhält man die *Allgemeine Zustandsgleichung idealer Gase* $p \cdot V/T = \text{const.}$

(oder je nach Jahrgang und Schultyp auch in der Form $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$ oder $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$).

Nicht immer wird als Folgerung der Zusammenhang

$p/T = \text{const.}$ (falls V konstant ist)

erwähnt. Als eigenständiges Gesetz kommt es nur selten in der Literatur vor, und zwar als Gesetz von Amontons ([6],[9]), als 2. Gesetz von Gay-Lussac ([7]) oder als Gesetz von Charles ([13]).

Es ist physikalisch (und mathematisch) offensichtlich, daß eine Herleitung der Absoluten Temperatur genauso gut mit dem Gesetz von Amontons statt mit dem Gesetz von Gay-Lussac beginnen könnte. Zusammen mit dem Gesetz von Boyle-Mariotte ergibt sich auf analoge Weise die *Allgemeine Zustandsgleichung idealer Gase*.

Es stellt sich nun die Frage, warum das Gesetz von Amontons so selten erwähnt wird.

Sind es experimentelle Schwierigkeiten, wie es ein Zitat aus einem weitverbreiteten Buch nahelegt: *“... erlaubt keine Messungen über die Größe der eingetretenen Druckzunahme. Solche Messungen sind auch mit aufwendigen Apparaturen recht schwierig, wenn man hinreichend genaue Messungen erhalten will. Wir können sie daher in der Schule nicht durchführen”*.

Nicht zuletzt aufgrund dieser Feststellung haben wir uns die Frage gestellt: Braucht man dazu wirklich eine aufwendige Apparatur wie z.B. einen Dampfdrucktopf nach Papin? Von welcher Art könnten didaktische Schwierigkeiten sein?

An dieser Stelle wird nun ein Versuch dargestellt, wie man das Gesetz von Amontons und damit die Einführung der Absoluten Temperatur in einfacher Weise erhalten kann. Die Materialien sind so preiswert zu beschaffen, wenn nicht sogar im Haushalt bereits vorhanden, daß interessierte Schüler sogar im Heimversuch dieses Gesetz finden können. Das Erlebnis, den Absoluten Nullpunkt selbst zuhause “bestimmt” zu haben, kann im Hinblick auf die Motivation für das Fach Physik nicht hoch genug eingeschätzt werden. Auch die Themenbereiche Wärmestrahlung und Luftdruck finden in diesem Experiment eine praktische Anwendung bzw. Ergänzung.

2. Versuch

2.1 Vorarbeiten

Außer den Meßgeräten für Druck und Temperatur braucht man ein Gefäß mit konstantem Volumen. Hier bietet sich ein Einmachglas an (Volumen 0,5 oder 1 Liter, ca. DM 5.-) in der üblichen Version mit einem Glasdeckel, der von einer Klammer aufgepreßt wird, sowie einem möglichst neuen Dichtungsring (Einmachgummi).

In dieses Einmachglas (Durchmesser der Öffnung ca. 9 cm) müssen ein Barometer (Bereich: 950 bis 1070 hPa, im Fachhandel ca. DM 80.-) und ein Thermometer (Bereich: -20 bis +50 °C, ca. DM 5.-) hineinpassen. Um den Einfluß der Wärmestrahlung auszuschließen, wird der Vorratsbehälter des Thermometers mit einem Streifen Aluminiumfolie überklebt.

Das Barometer muß den “richtigen” Luftdruck (nicht den wie im Wetterbericht auf NN reduzierten) anzeigen. Am sichersten ist ein Vergleich mit einem geeichten Hg-Barometer, wie es in vielen Schulen vorhanden sein müßte, um eventuelle Abweichungen korrigieren zu können. Das von uns verwendete kommerzielle Dosenbarometer zeigte Abweichungen von ± 2 hPa (entspricht der Herstellerangabe/siehe Eichkurve in Bild 1). Analog sollte man mit dem verwendeten Thermometer verfahren (z.B. zwischen 36°C und 42°C Vergleich mit einem geeichten Fieberthermometer); in unserem Fall erhielten wir eine Abweichung von ± 1 K.

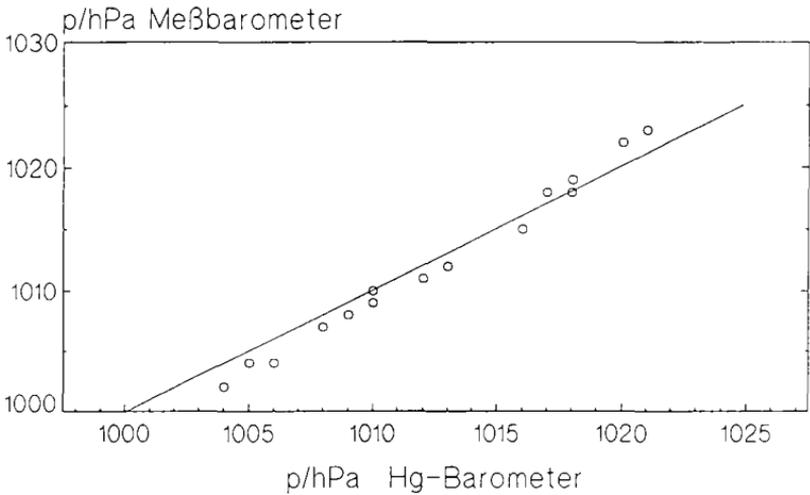


Bild 1: *Eichkurve (geeichtes Hg-Barometer und Meßbarometer)
Die eingezeichnete Gerade ist die Nullpunktsgerade mit Steigung 1.*

Das Barometer wird auf den Boden des Einmachglases gestellt und mit einem Klebeband fixiert; mit einem weiteren Klebeband befestigt man auch das Thermometer so in der Mitte des Deckels, daß es in halber Höhe des Einmachglases zu hängen kommt (siehe Bild 2).

Temperaturänderungen sind wegen der Trägheit der Thermometeranzeige nicht zu rasch durchzuführen. Wichtig ist für diesen Versuch, daß die Dichtung zuverlässig über längere Zeit so gut schließt, daß das eingeschlossene Luftvolumen (im Rahmen der Genauigkeit) konstant bleibt.

Dies läßt sich zu Beginn und zur Kontrolle auch während des Versuchs überprüfen, indem man das Einmachglas mit Barometer und Thermometer verschließt, den Druck und die Temperatur notiert und in das Tiefkühlfach oder in ein warmes Wasserbad stellt. Nach dem Herausnehmen muß man abwarten, bis sich wieder Zimmertemperatur eingestellt hat. Bei "gutem" Verschluss (Einmachgummi) stellt sich bei gleicher Ausgangstemperatur der Ausgangsdruck wieder ein.

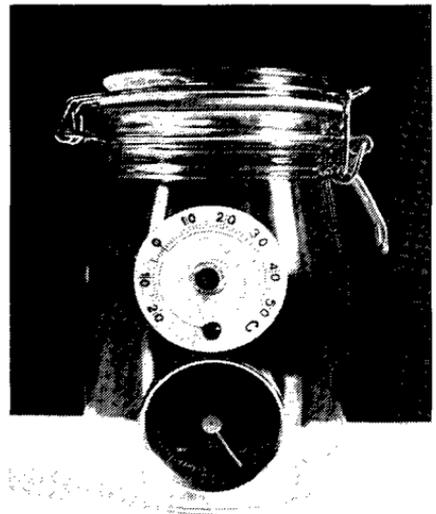


Bild 2: *Versuchsordnung*

2.2 Versuchsdurchführung

Um den Meßbereich des Barometers auszunutzen, empfiehlt es sich, das Einmachglas bei Normaldruck zu verschließen und anschließend in einem Wasserbad bis zur maximalen Druckanzeige zu erwärmen; nach dem Herausnehmen wird das Einmachglas auf ein Stück Styropor gestellt oder frei aufgehängt. So wird eine ungleichmäßige Erwärmung verhindert. Nun kann mit der Meßreihe begonnen werden.

Die allseitige Wärmeleitung durch die Glaswände sorgt für eine Temperaturniedrigung der Innenluft und somit für einen Druckrückgang. Die beiden Meßwerte p und ϑ können nun abgelesen und tabelliert werden. Vor dem Ablesen des Drucks sollte man ein paar Mal gegen die Glaswände klopfen, damit der Zeiger des Barometers nicht hängen bleibt. Eine gute Kontrolle für die Dichtigkeit und damit für die Konstanz des Volumens bietet das Erreichen der Ursprungstemperatur und damit des Ursprungsdrucks. Stellt man das Einmachglas einige Zeit in den Kühlschrank oder in die Tiefkühltruhe, so lassen sich nach dem Herausnehmen weitere Meßwerte bis zum erneuten Erreichen der Zimmertemperatur erfassen.

2.3 Versuchsergebnisse und -auswertung

Die folgenden Darstellungen stehen stellvertretend für mehrere Meßreihen.

Mit einem einfachen Taschenrechner-Programm wurde eine Regressionsgerade (d.h. die Gerade, die optimal an die Meßpunkte angepaßt ist) und der Schnittpunkt mit der ϑ -Achse berechnet.

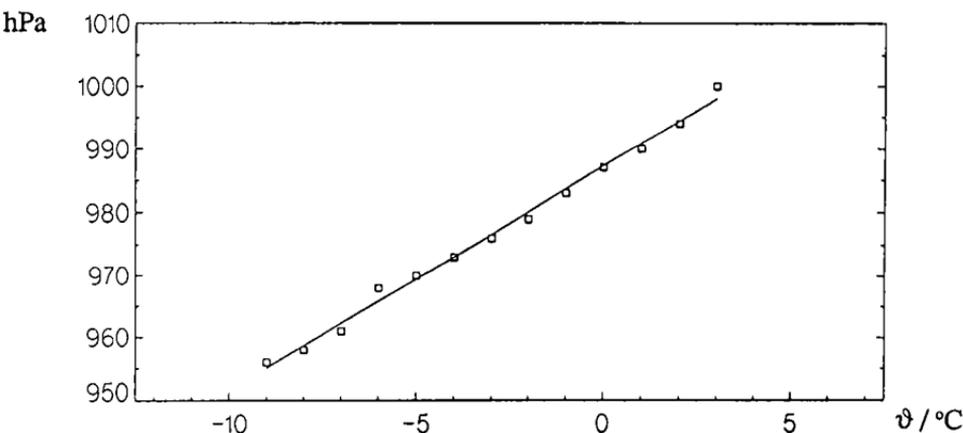


Bild 3: ϑ - p -Diagramm, Einmachglas 0,5 Liter
Schnittpunkt mit der ϑ -Achse: -277°C

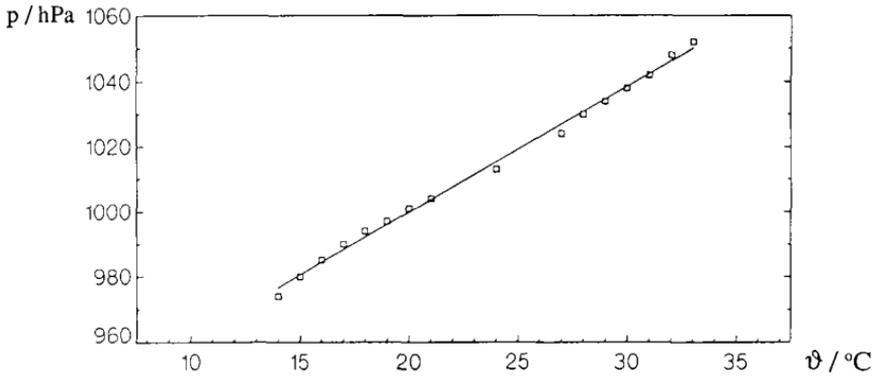


Bild 4: ϑ - p -Diagramm, Einmachglas 0,5 Liter
Schnittpunkt mit der ϑ -Achse: -240°C

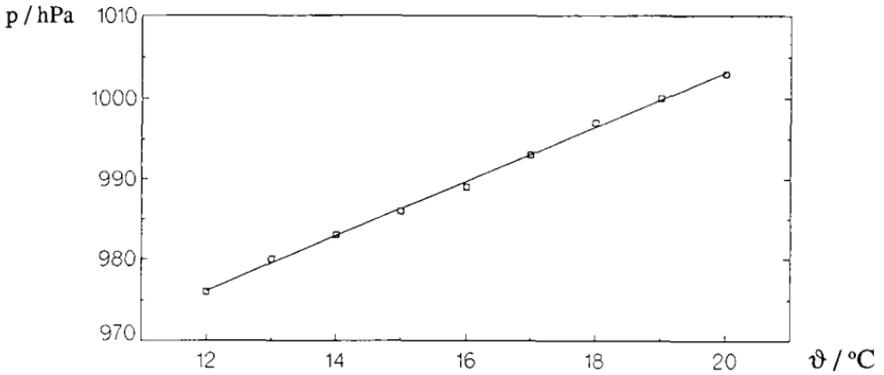


Bild 5: ϑ - p -Diagramm, Einmachglas 1 Liter
Schnittpunkt mit der ϑ -Achse: -277°C

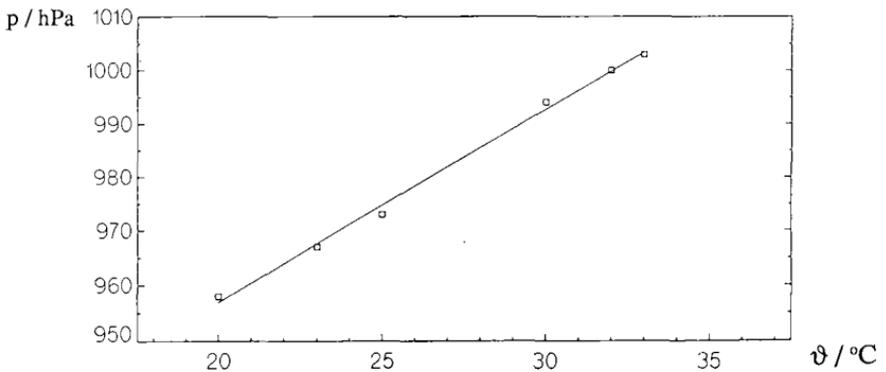


Bild 6: ϑ - p -Diagramm, Einmachglas 1 Liter
Schnittpunkt mit der δ -Achse: -247°C

2.4 Fehlergrenzen

Die Fehlerrechnung wurde für die Meßreihe in Bild 4 durchgeführt, da sich mit -240°C der relativ schlechteste Wert für den Absoluten Nullpunkt ergeben hatte.

Aus dieser Meßreihe ergibt sich die Regressionsgerade $p(\vartheta) = 3,84 \text{ hPa}/^{\circ}\text{C} \cdot \vartheta + 923 \text{ hPa}$ und damit ein Schnittpunkt mit der ϑ -Achse von -240°C .

Um den Fehlerbereich abschätzen zu können, muß man untersuchen, um wieviel sich die Steigung k ändert, wenn die Fehler von p und ϑ berücksichtigt werden.

Aus der Steigung $k = (p_2 - p_1) / (\vartheta_2 - \vartheta_1)$ kann man den Fehler Δk berechnen:

$$\begin{aligned} (\Delta k)^2 &= \left(\frac{\partial k}{\partial p_2} \Delta p_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial p_1} \Delta p_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial \vartheta_2} \Delta \vartheta_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial k}{\partial \vartheta_1} \Delta \vartheta_1 \right)^2 = \\ &= \left(\frac{1}{\vartheta_2 - \vartheta_1} \Delta p \right)^2 + \left(-\frac{1}{\vartheta_2 - \vartheta_1} \Delta p \right)^2 + \left(\frac{p_2 - p_1}{(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2} \Delta \vartheta \right)^2 + \left(-\frac{p_2 - p_1}{(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2} \Delta \vartheta \right)^2 = \\ &= 2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{\vartheta_2 - \vartheta_1} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{(p_2 - p_1) \cdot \Delta \vartheta}{(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2} \right)^2 \end{aligned}$$

Mit Hilfe der beiden Geradenpunkte $(p_1; \vartheta_1) = (977 \text{ hPa}; 14^{\circ}\text{C})$ und $(p_2; \vartheta_2) = (1050 \text{ hPa}; 33^{\circ}\text{C})$ ergibt sich:

$$(\Delta k)^2 = 2 \cdot \left(\frac{4 \text{ hPa}}{19 \text{ K}} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{73 \text{ hPa} \cdot 2 \text{ K}}{361 \text{ K}^2} \right)^2 = 0,42 \left(\frac{\text{hPa}}{\text{K}} \right)^2$$

Der Fehler beträgt $\Delta k = 0,64 \frac{\text{hPa}}{\text{K}}$ (rel. Fehler $\approx 17\%$)

Für den Schnittpunkt mit der ϑ -Achse ergibt sich aus $k_{\text{max}} = 4,48 \text{ hPa}/^{\circ}\text{C}$ und $k_{\text{min}} = 3,20 \text{ hPa}/^{\circ}\text{C}$ als Wertebereich für den Absoluten Nullpunkt $[-206^{\circ}\text{C}; -288^{\circ}\text{C}]$, d.h. der exakte Wert von -273°C liegt innerhalb dieses Bereichs.

3. Didaktische Hinweise

Die Schreibweise für das *Gesetz von Gay-Lussac*: $V/T = \text{const}$ (falls p konstant ist) wird richtigerweise dahingehend interpretiert, daß bei einem anderen Druck p der Quotient V/T einen anderen konstanten Wert annimmt.

Genauso korrekt ergibt beim *Gesetz von Boyle-Mariotte*: $p \cdot V = \text{const}$ (falls T konstant ist) eine andere Temperatur T ein anderes konstantes Produkt $p \cdot V$.

Ergibt nun ein anderes Volumen beim Gesetz von Amontons auch einen anderen Quotienten p/T ? Wiederholt man den Versuch bei gleichen Anfangsbedingungen von Druck und Temperatur mit einem Einmachglas anderen Volumens, so erscheint es vielleicht überraschend, daß sich der Quotient p/T nicht verändert hat.

Es hat sich dabei natürlich mit dem Volumen auch die Anzahl N der eingeschlossenen Gasteilchen verändert und gleiche Anfangsbedingungen bedeuten eben konstante Teilchendichte N/V (*Allgemeine Zustandsgleichung idealer Gase* $p/T = k \cdot N/V$). Bei Mitteilung der Boltzmann-Konstanten k ließe sich also aus dem Meßergebnis p/T der interessante Wert der Teilchendichte des eingeschlossenen Luftvolumens angeben bzw. nach Angabe oder Abschätzung der Teilchendichte die Boltzmann-Konstante berechnen.

Erst durch Veränderung der Anfangsbedingungen (z.B. Erwärmung des offenen Einmachglases in Wasser) vor dem Verschließen erhält man einen anderen Quotienten p/T , d.h. eine Gerade anderer Steigung, deren Schnittpunkt mit der ϑ -Achse wieder bei etwa -273°C liegt.

Bei den Gesetzen von Gay-Lussac und Boyle-Mariotte wird immer ein abgeschlossenes Volumen, d.h. gleiche Teilchenzahl N , verwendet. Der übliche Zusatz "falls eine Größe konstant ist" bedarf u.E. für das Gesetz von Amontons der obigen zusätzlichen Erläuterung im Vergleich zu den anderen Gasgesetzen.

Wird also dieser Versuch bei einer Schülerübung von mehreren Gruppen mit Einmachgläsern verschiedenen Volumens durchgeführt, so ergibt sich derselbe Quotient für p/T , da in diesem Fall die Anfangsbedingungen gleich sind. Falls bei der anschließenden Diskussion über die Meßwerte eine Naturkonstante für den Wert p/T vermutet wird, so bieten sich Heimversuche unter unterschiedlichen Anfangsbedingungen an.

Diese einfache Versuchsanordnung erlaubt auch die Untersuchung anderer Gase. Analoge Meßergebnisse erhält man z.B. bei Verwendung von Butan (Kartusche für Campingkocher).

Ein weiterer Vorteil der Versuchsanordnung besteht darin, daß die Konstanz der Zustandsgröße Volumen dem Schüler offensichtlicher erscheint als die Konstanz der Zustandsgröße Druck beim Gasthermometer. Von Bedeutung erscheint uns auch die Tatsache, daß Schüler mit vertrauten Gegenständen vom Lehrer zu experimenteller Aktivität in diesem Sachbiet angeleitet werden können (und sogar ohne den nicht ungefährlichen Umgang mit Quecksilber).

Von einem Physiklehrer wird ja nicht nur Wissensvermittlung gefordert; er ist auch verantwortlich für die Einstellung seiner Schüler dem Fach gegenüber. Wie Umfragen zeigen, rangiert das Schulfach Physik innerhalb des unteren Bereichs der Beliebtheitskala von Schulfächern. Beklagt wird in diesem Zusammenhang von vielen Schülern das Übergewicht an abstrakten Formeln und der Mangel an Alltagsbezug. Vielfach geäußerter Wunsch der Schüler ist auch das Experimentieren mit einfachen Mitteln. Ein Einbinden von Gegenständen aus der Erfahrungswelt der Jugendlichen kann somit die Attraktivität des Faches Physik fördern.

Wir glauben mit dieser einfachen und preiswerten Möglichkeit für Lehrereperiment, Schülerübung bzw. Heimversuch einen Weg gefunden zu haben, der den Zugang zur Physik der Gase vor allem in der Mittelstufe wesentlich erleichtern hilft, selbst wenn die Genauigkeit nicht mit der von üblichen Schulgeräten verglichen werden kann. Der Meßbereich für die Druckbestimmung beträgt nur etwa 10% des Ausgangswerts ($\Delta p/p \approx 10\%$) im Gegensatz zur anfangs erwähnten Meßapparatur "Gasthermometer" ($\Delta V/V \approx 30\%$).

Aber die Erkenntnis, daß mit Hilfe dieser einfachen Versuchsanordnung die Existenz eines absoluten Nullpunkts nachgewiesen werden kann, sollte gerade am Anfang des Stoffgebietes für den Schüler wichtiger sein als die Kenntnis des (mehr oder minder genauen) Zahlenwerts.

Herrn Prof. Luchner danken wir für seine Unterstützung und für viele wertvolle Hinweise.

Literatur:

[1]	Hammer u.a.	Physik 9.Jahrgangsstufe/A	Oldenbourg	1979
[2]	Feuerlein-Schäflein	Physik 2	bsv	1979
[3]	Dorn-Bader	Physik 9. Jahrgangsstufe	Schroedel	1978
[4]	Dorn	Physik Ausgabe C	Schroedel	1970
[5]	Dorn-Bader	Physik in einem Band	Schroedel	1976
[6]	Grehn (Hg.)	Physik	Metzler	1988
[7]	Höfling	Physik Band I	Dümmler	1976
[8]	Kuhn	Physik Band 1	Westermann	1975
[9]	Bergmann-Schröder	Einführung in die Physik	Diesterweg	1984
[10]	Fa. Leybold	Hauptkatalog		1992
[11]	Becker	Theorie der Wärme	Springer	1966
[12]	Herder-Lexikon	Naturwissenschaftler	Herder	1979
[13]	Gerthsen-Kneser-Vogel	Physik	Springer	1982