

3.2. Gasthermometer

Ziel

Verifizierung von Zusammenhängen, die durch die ideale Gasgleichung beschrieben werden (isotherme und isochore Zustandsänderung),
Bestimmung des absoluten Nullpunktes durch Extrapolation

Hinweise zur Vorbereitung

Die Antworten auf diese Fragen sollten Sie vor der Versuchsdurchführung wissen. Sie sind die Grundlage für das Gespräch mit Ihrer Tutorin/Ihrem Tutor vor dem Versuch. Informationen zu diesen Themen erhalten Sie in der unten angegebenen Literatur.

- Welchen Referenzpunkt wählt man zur Definition der absoluten Temperatur?
 - Kann der absolute Nullpunkt erreicht werden?
- Welche Voraussetzungen erfüllt ein ideales Gas? Wie unterscheidet sich ein reales Gas davon?
 - Wie lautet die Zustandsgleichung des idealen Gases?
 - Wie lautet die van der waalssche Zustandsgleichung des realen Gases?
 - Was bedeuten die Begriffe Isotherme, Isochore, Isobare und Adiabate (= Isentrope)?
- Was misst ein Manometer, was ein Barometer?

Zubehör

- luftgefüllte Hohlkugel aus Glas mit angesetztem Glasrohr
- großes Glasgefäß als Wasserbad
- Heizplatte
- elektronisches Manometer
- Thermometer
- Plexiglasröhre mit dicht schließendem verschiebbaren Kolben und mechanischem Manometer

Grundlagen

Das ideale Gasgesetz und seine „Vorläufer“

Ändert man bei einem Gas das Volumen V (Kompression oder Expansion), den Druck p oder die Temperatur T (Erhitzen oder Abkühlen), so ändert sich auch immer wenigstens eine der beiden anderen Größen. Dies gilt zumindest dann, wenn die Stoffmenge n unverändert bleibt, was im Folgenden stets vorausgesetzt werden soll.

Bei einer **isothermen** Zustandsänderung wird die Temperatur T konstant gehalten. Der Zusammenhang zwischen Druck p und Volumen V wird dann durch die Gleichung

$$p \cdot V = \text{konstant} \quad (3.2.1)$$

beschrieben. Man bezeichnet diese oft als Gesetz von Boyle-Mariotte. Die entsprechende Kurve in einem Zustandsdiagramm heißt **Isotherme**.

Bei einer **isochoren** Zustandsänderung wird das Volumen V konstant gehalten. Der Zusammenhang zwischen Druck p und absoluter Temperatur T wird dann durch die Gleichung

$$\frac{p}{T} = \text{konstant} \quad (3.2.2)$$

beschrieben. Man bezeichnet diese oft als Gesetz von Charles oder auch als Gesetz von Amontons. Die entsprechende Kurve in einem Zustandsdiagramm heißt **Isochore**.

Bei einer **isobaren** Zustandsänderung wird der Druck p konstant gehalten. Der Zusammenhang zwischen Volumen V und absoluter Temperatur T wird dann durch die Gleichung

$$\frac{V}{T} = \text{konstant} \quad (3.2.3)$$

beschrieben. Man bezeichnet diese meist als Gesetz von Gay-Lussac, obwohl das Gesetz bereits früher von Amontons aufgestellt wurde. Die entsprechende Kurve in einem Zustandsdiagramm heißt **Isobare**.

Das **ideale Gasgesetz**¹ kombiniert die drei soeben beschriebenen Spezialfälle, erweitert sie um den Begriff der Stoffmenge und lautet

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3.2.4)$$

¹Das ideale Gasgesetz wird manchmal auch als „Zustandsgleichung des idealen Gases“ oder als „Gleichung von Clapeyron und Mendelejew“ bezeichnet.

mit

$$\begin{aligned}
 p &= \text{Druck,} \\
 V &= \text{Volumen,} \\
 n &= \text{Stoffmenge}^2, \\
 R &= \text{universelle Gaskonstante,} \\
 T &= \text{absolute Temperatur.}
 \end{aligned}$$

Luftthermometer

Der im Praktikum ursprünglich zur Untersuchung der isochoren Zustandsänderung verwendete Aufbau wird als jollysches Luftthermometer bezeichnet ([Gob74] S. 586). Bei diesem Gerät erfolgt die Druckmessung eigentlich über eine Quecksilbersäule. Aus Sicherheitsgründen wurde die Quecksilbersäule im Praktikum inzwischen durch ein elektronisches Manometer ersetzt.

Thermische Ausdehnung

Viele Stoffe dehnen sich bei Erwärmung aus. Als Maß für die thermische Ausdehnung eines Stoffes verwendet man den linearen Ausdehnungskoeffizienten α und den Volumenausdehnungskoeffizienten β . Für eine Länge x und das Volumen V eines Körpers bei zwei verschiedenen Temperaturen T_1 und T_2 gilt

$$x(T_2) = x(T_1) \cdot [1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)] \quad (3.2.5)$$

$$V(T_2) = V(T_1) \cdot [1 + \beta \cdot (T_2 - T_1)] \quad (3.2.6)$$

$$\begin{aligned}
 &= V(T_1) \cdot [1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)]^3 \\
 &\approx V(T_1) \cdot [1 + 3\alpha \cdot (T_2 - T_1)] \quad . \quad (3.2.7)
 \end{aligned}$$

Dabei ist allerdings zu beachten, dass α meist selbst von der Temperatur abhängt, so dass keine zu großen Temperaturänderungen betrachtet werden dürfen. Einige Werte für α sind in Tabelle 3.2.1 zusammengestellt.

Versuchsdurchführung

Hinweis: Zur Zeitersparnis können Sie die beiden Versuchsteile (isochore/isotherme Zustandsänderung) parallel durchführen.

Isochore Zustandsänderung:

1. Bauen Sie die Anordnung so auf, dass das große Glasgefäß auf der Heizplatte steht und sich die Hohlkugel darin befindet.

²Die Stoffmenge wird in der Einheit 1 Mol = 1 mol angegeben.

Es gilt: 1 mol = N_A Teilchen $\approx 6.023 \cdot 10^{23}$ Teilchen.

Stoff	$\alpha/(10^{-6} \text{ K}^{-1})$	$\beta/(10^{-3} \text{ K}^{-1})$	T	Zitat
Luft		3.674		[Gob74]
N ₂		3.674		[Gob74]
O ₂		3.674		[Gob74]
H ₂		3.662		[Gob74]
He		3.660		[Gob74]
Ne		3.662		[Gob74]
Ar		3.671		[Gob74]
CO ₂		3.726		[Gob74]
Hg		0.18	$\approx 18^\circ\text{C}$	[KS87, Gob74]
Äthanol		1.10	$\approx 18^\circ\text{C}$	[KS87, Gob74]
Azeton		1.43	$\approx 18^\circ\text{C}$	[KS87]
Wasser		0.053	$5^\circ\text{C} \dots 10^\circ\text{C}$	[KS87]
Wasser		0.150	$10^\circ\text{C} \dots 20^\circ\text{C}$	[KS87]
Wasser		0.302	$20^\circ\text{C} \dots 40^\circ\text{C}$	[KS87]
Wasser		0.458	$40^\circ\text{C} \dots 60^\circ\text{C}$	[KS87]
Wasser		0.587	$60^\circ\text{C} \dots 80^\circ\text{C}$	[KS87]
Glas	8.5		$\approx 20^\circ\text{C}$	[KS87]
Pyrex-Glas	3.0		$\approx 20^\circ\text{C}$	[KS87]
Quarz (geschmolzen)	0.5		$\approx 20^\circ\text{C}$	[KS87]
Eis	50.7		$-10^\circ\text{C} \dots 0^\circ\text{C}$	[KS87]

Tabelle 3.2.1.: Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient α und thermischer Volumenausdehnungskoeffizient β für verschiedene Stoffe.

- Füllen Sie das große Glasgefäß mit Eis und Wasser, damit sich eine konstante Temperatur von 0°C ergibt.
- Beobachten Sie die Anzeige des elektronischen Manometers und warten Sie, bis diese sich nicht mehr ändert. Sie können dann davon ausgehen, dass die Temperatur der Luft im Inneren des Glasballons ebenfalls konstant ist.
Notieren Sie den entsprechenden Druck.
- Schalten Sie die Heizplatte ein und notieren Sie während Sie das Wasserbad langsam erwärmen etwa alle 2°C Temperatur T und Druck p .
Hinweis: Bei zu schnellem Erwärmen könnte sich ein großer Temperaturunterschied zwischen dem Wasserbad und der Luft im Inneren des Glasballons ergeben. Rühren Sie das Wasserbad auch häufig um, um eine möglichst gleichmäßige Erwärmung zu erzielen.

Isotherme Zustandsänderung:

- Öffnen Sie das Ventil und stellen Sie mit dem beweglichen Kolben in dem Plexiglasrohr ein beliebiges Volumen ein.

- Schließen Sie das Ventil.
- Messen Sie für mindestens(!) 10 verschiedene Volumina jeweils Volumen und Druck.
Hinweis: Warten Sie nach dem Verschieben des Kolbens jeweils lange genug, um einen Temperaturengleich mit der Umgebung zu ermöglichen.
- Wiederholen Sie die Punkte 5 bis 7 für mindestens ein weiteres Ausgangsvolumen.

Auswertung

- Zeichnen Sie ein pT -Diagramm für die isochore Zustandsänderung.
- Berechnen Sie die Ausgleichsgerade zu den Messwerten.
Bestimmen Sie den Schnittpunkt dieser Geraden mit der T -Achse³.
Erklären Sie die Bedeutung dieses Schnittpunktes.
Wiederholen Sie die Berechnung der Ausgleichsgeraden und des Schnittpunktes, verwenden Sie diesmal aber nur die Datenpunkte im Temperaturbereich $40^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C}$. Worauf könnte die beobachtete Abweichung der Ergebnisse zurückzuführen sein?
- Zeichnen Sie ein pV -Diagramm für die isothermen Zustandsänderungen.
- Zeichnen Sie zusätzlich ein Diagramm, in dem Sie p über $1/V$ auftragen, und überprüfen Sie graphisch den linearen Zusammenhang.

Fragen und Aufgaben

- Welche Voraussetzungen beinhaltet die Modellvorstellung eines idealen Gases.
Wo weichen diese Voraussetzungen vom realen Gas ab?
- Was ist „Temperatur“?
- Mindestens zwei systematische Fehlerquellen könnten die Messung beeinträchtigen:
 - Die thermische Ausdehnung des Glaskolbens⁴.
 - Das „schädliche Volumen“ im Glasrohr zwischen der geheizten Hohlkugel und dem Manometer enthält Luft unterschiedlicher Temperatur.

Wie wären diese Fehlerquellen zu berücksichtigen?
Gibt es weitere systematische Fehlerquellen?

³Man bezeichnet diese Vorgehensweise als Extrapolation.

⁴Da sich ein Gas rund 500mal so stark ausdehnt wie Glas ([Gob74] S. 587), kann man i. Allg. die Ausdehnung des Glasgefäßes vernachlässigen.

Ergänzende Informationen

Historisches

Eine ausführliche Definition verschiedener Temperaturskalen findet sich z. B. unter <http://www.wordiq.com/definition/Celsius>. In Tabelle 3.2.2 sind einige wichtige Daten zusammengestellt.

1641	Florenz:	erstes Thermometer im Abendland
1714	Fahrenheit:	0°F Kältemischung aus Salmiak und Eis, 32°F Eispunkt, 98.6°F normale Körpertemperatur des Menschen, 212°F Siedepunkt des Wassers,
1724		Unterkühlung des Wassers,
1730	Réaumur:	0°R Gefrierpunkt des Wassers, 80°R Siedepunkt des Wassers,
1742	Celsius:	0°C Gefrierpunkt des Wassers, 100°C Siedepunkt des Wassers bei 760 Torr
1874	Jolly:	Gasthermometer

Tabelle 3.2.2.: Einige historische Daten zur Temperaturmessung.

Literaturhinweise

Das ideale Gasgesetz wird in jedem einführenden Lehrbuch der Wärmelehre beschrieben, wobei die Ausführlichkeit der Darstellung sehr schwankt.

Literaturverzeichnis

- [Gob74] GOBRECHT, HEINRICH: *Bergmann-Schaefer – Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band I: Mechanik, Akustik, Wärme. Walter de Gruyter, Berlin, 9. Auflage, 1974.
- [KS87] KOSCHKIN, N. I. und M. G. SCHIRKEWITSCH: *Elementare Physik*. Verlag MIR Moskau und Akademie-Verlag Berlin, 1987.