

Das Gasthermometer ist zur Untersuchung der Gesetzmäßigkeiten idealer Gase geeignet. Insbesondere ermöglicht es eine experimentelle Einführung der absoluten Temperaturskala und gestattet die Bestimmung des absoluten Nullpunktes. Weiterhin wird der Volumenausdehnungskoeffizient von Luft bestimmt.

1. Theoretische Grundlagen

1.1 Beschreibung und technische Daten des Gasthermometers

Das Thermometer besteht aus einer einseitig geöffneten Glaskapillare, in der mittels eines kleinen Quecksilbertropfens ein Gasvolumen eingeschlossen werden kann (**Bild 1**). Die Länge des eingeschlossenen Gasvolumens kann auf einer an der Kapillare angebrachten Millimeterskala abgelesen werden. In einer Ausbauchung am offenen oberen Ende des Gasthermometers befindet sich Silikagel zur Trocknung der in die Kapillare eintretenden Luft. Durch eine gasdurchlässige Fritte zwischen der Ausbauchung und der Kapillare wird verhindert, dass Quecksilber aus dem Gasthermometer austreten kann. Eine zweite, kleine Ausbauchung direkt vor der Glasfritte dient zum Sammeln des Quecksilbers, falls der Quecksilbertropfen durch Erschütterung in kleine Kügelchen zersprungen ist.

Zum Gerät gehört ein großes temperaturschockbeständiges Reagenzglas zur Aufnahme eines Wärmebades, dessen Temperatur z.B. mit einem Bunsenbrenner variiert werden kann.

1.2 Gasfeder

Das im Gasthermometer durch einen leicht beweglichen Quecksilbertropfen eingeschlossene Gasvolumen lässt sich als Gasfeder betrachten, die einige Analogien zu einer Schraubenfeder aufweist.

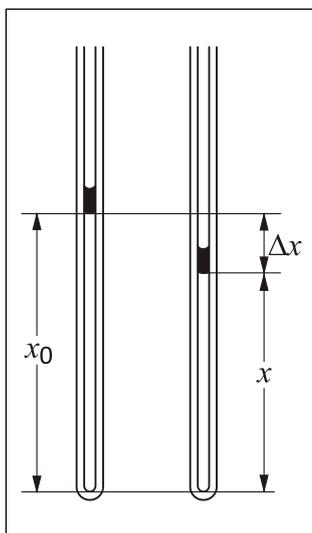


Bild 1: Skizze Gasfeder

Wirkt auf den Quecksilbertropfen eine Kraft F , so wird dieser aus seiner Ruhelage, gekennzeichnet durch die Ruhelänge x_0 bzw. durch das Ruhévolumen

$$V_0 = A_{Kap} \cdot x_0, \quad (1)$$

um den Wert Δx abgelenkt (*siehe Bild 1*). Die auf den Quecksilbertropfen auszuübenden Kräfte lassen sich experimentell in einfacher Weise als Druckkräfte realisieren: Herrscht über dem Quecksilbertropfen zusätzlich zum Umgebungsluftdruck p_L eine Druckkomponente Δp , so wird auf den Tropfen die Kraft

$$F = \Delta p \cdot A_{Kap} \quad (2)$$

ausgeübt. Der Tropfen verschiebt sich dann so lange, bis die Gasfeder eine gleich große Gegenkraft ausübt.

In einem Teilversuch soll untersucht werden, ob für die Gasfeder analog zur Schraubenfeder das Hookesche Gesetz

$$F = k \cdot \Delta x \quad k: \text{Federkonstante} \quad (3)$$

gilt, d. h. der lineare Zusammenhang von einwirkender Kraft F und Änderungsweg Δx .

1.3 Boyle-Mariottesches Gesetz (*Isotherme Zustandsänderung*)

Die Zustandsgrößen Gasdruck und Gasvolumen einer abgeschlossenen Gasmenge bei konstanter Temperatur sind nicht unabhängig voneinander. Innerhalb des durch den Quecksilbertropfen abgeschlossenen Volumens des Gasthermometers soll bei konstanter Temperatur der Druck p über einen größeren Bereich geändert werden. Das jeweilige Gasvolumen V ist zu bestimmen.

Es ist im Versuch nachzuweisen, dass für die isotherme Zustandsänderung das Boyle-Mariottesche Gesetz gilt:

$$p \cdot V = \text{konst.} \quad (4)$$

1.4 Gay-Lussacsches Gesetz (*Isobare Zustandsänderung*)

Die Zustandsgrößen Volumen und Druck einer vorgegebenen Gasmenge sind von der Temperatur abhängig. Für die durch den Quecksilbertropfen eingeschlossene Gasmenge im Gasthermometer soll die Temperaturabhängigkeit des Volumens bestimmt werden. Der Temperaturbereich soll sich von 0°C bis ca. 100°C erstrecken.

Untersucht wird, ob ein linearer Zusammenhang zwischen Volumen und Temperatur besteht. Durch Extrapolation nach tiefen Temperaturen sind ein absoluter Temperatur-Nullpunkt und damit eine absolute Temperaturskala definierbar.

Der Volumenausdehnungskoeffizient γ (*räumlicher Ausdehnungskoeffizient* $[\gamma] = 1 \text{ K}^{-1}$) beschreibt die Ausdehnung des Gases bei einer Erhöhung der Temperatur:

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta \vartheta \quad V_0: \text{Volumen bei } 0^\circ\text{C} \quad (5)$$

2. Versuch

2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe 1: Skizzieren Sie die Versuchsanordnung und tragen Sie folgendes ein:

- die relevanten Größen (*Kräfte, Querschnittsflächen*), die nach dem Hookeschen Gesetz auf den Quecksilberfaden einwirken bzw.
- die relevanten Größen (*Druck, Volumen*), die nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte auf die eingeschlossene Luftsäule des Gasthermometers einwirken können.

Aufgabe 2: In einem Gasthermometer ($d_i=3 \text{ mm}$) ist unterhalb des Quecksilbertropfens Luft eingeschlossen. Durch Erwärmung des Gasthermometers ($0 \dots 100^\circ\text{C}$) dehnt sich die Luft unterhalb des Quecksilbertropfens aus und somit ändert sich auch die absolute Höhe des Quecksilbertropfens $x=(172 \dots 233) \text{ mm}$ (*Wertetabelle siehe 3.1 Zusätzliche Betrachtungen*).

- Berechnen Sie aus den sich einstellenden absoluten Höhen x die einzelnen Volumenwerte V unterhalb des Quecksilbertropfens.
- Stellen Sie die Funktion $V = f(\vartheta)$ graphisch dar und bestimmen Sie den Anstieg der Funktion.
- Berechnen Sie das **Volumen V_0** sowie den **Volumenausdehnungskoeffizienten γ** .

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Verwendete Geräte

Gasthermometer, großes Reagenzglas zur Temperierung, Thermometer, Kolbenprober, Stativmaterial, Wägesatz, Dreiwegehahn, Butangasbrenner, Messschieber (*Quecksilberdichte: $\rho_{\text{Hg}}=13,55 \text{ g/cm}^3$*)

2.2.2 Versuchshinweise

Aufgabe 1: Bestimmung der Wegänderung des Quecksilbertropfens zur aufgewendeten Kraft

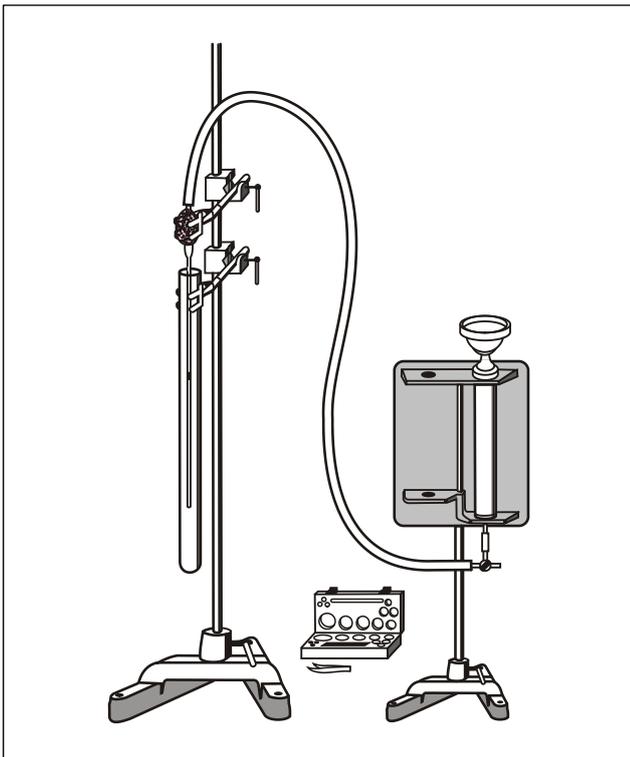


Bild 2: Versuchsaufbau

- Überprüfen Sie, ob der Versuchsaufbau **Bild 2** mit angeschlossenem Kolbenprober 100ml und geöffnetem Dreivegehahn entspricht.
- Ermitteln Sie zunächst den Durchmesser d und die Masse m des Kolbens.
- Bestimmen Sie die Höhe h des Quecksilbertropfens bei geöffnetem Dreivegehahn.
- Lesen Sie x_0 (siehe **Bild 1**) ab (x_0 sollte bei ca. $\frac{2}{3}$ der Gesamtlänge der Kapillare liegen).
- Stecken Sie den Kolben vorsichtig in den Glaszylinder und verschließen Sie den Dreivegehahn.
- Legen Sie auf den Gewichtsteller nacheinander verschiedene Gewichtsstücke der Masse m **von (0...1400) g in 100g-Schritten** auf.
- Lesen Sie die sich einstellende Länge x an der Skale ab. Dabei ist der Gewichtsteller möglichst symmetrisch zu belasten.
- Messen Sie den örtlichen Luftdruck p_L mit Hilfe eines Barometers (im Eingangsbereich).

Aufgabe 2: Bestimmung des Volumens als Funktion der Temperatur

- Bauen Sie nach **Bild 3** den Versuch um, und geben Sie in das äußere Reagenzglas eine Wasser-Eis-Mischung $\vartheta \approx 0^\circ\text{C}$ (*Laborpersonal*) und ein Thermometer.
- Führen Sie die Messung bei normalem Luftdruck durch. Dazu öffnen Sie den Dreivegehahn und ziehen vorsichtig den Kolben aus dem Kolbenprober heraus.
- Lesen Sie die Temperatur ϑ und die Auslenkung x ab (*1. Messwert*).
- Erhitzen Sie mit dem Bunsenbrenner das Wasser innerhalb des großen Reagenzglases bis zum Siedepunkt und lesen Sie die Auslenkung x ab.

Achtung:

Vorsicht – Verbrennungsgefahr!

- Lassen Sie nun das Gasthermometer abkühlen und lesen Sie jeweils **in Schrittweiten von $\Delta T = 10\text{ K}$** die Länge x ab. Die Messung ist mit Erreichen **von 30°C** zu Ende.

Um den Temperaturgradienten zwischen Wasser und Gasthermometer möglichst klein zu halten, wird empfohlen, die Messungen bei hohen Temperaturen zu beginnen und dann bei ausgeschaltetem Bunsenbrenner das Wasserbad langsam abkühlen zu lassen.

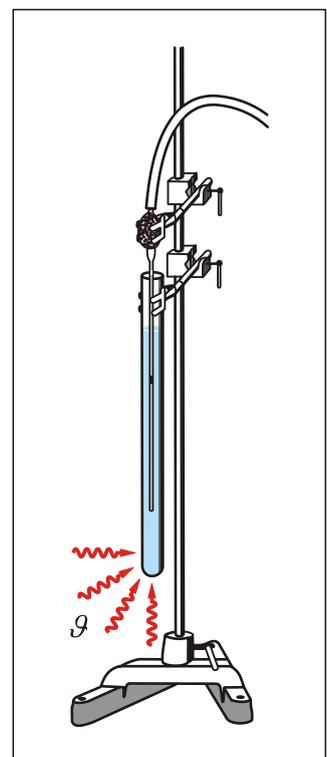


Bild 3: Versuchsaufbau

Technische Daten:**Gasthermometer:**

Gesamtlänge: 475 mm

Außendurchmesser der Kapillaren: $(8,00 \pm 0,05)$ mmInnendurchmesser der Kapillaren: $(2,70 \pm 0,05)$ mm**Reagenzglas:**

Länge: 440 mm

Außendurchmesser: $(30,0 \pm 0,1)$ mm

2.3 Versuchsauswertung

Aufgabe 1a: Nachweis des Hooke'schen Gesetzes

- Weisen Sie durch die graphische Bestimmung der Abhängigkeit $\Delta x = f(F)$ den Bereich der Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes nach.
- Tragen Sie die Regressionsgerade für den linearen Bereich ein, bestimmen Sie deren Anstieg und schätzen Sie durch Antragen der Fehlerbalken die relative Messunsicherheit ab.

Aufgabe 1b: Nachweis des Boyle-Mariotteschen Gesetzes

- Stellen Sie die Funktion $\log p = f(\log V)$ in einem Diagramm graphisch dar.
- Interpretieren Sie dieses Diagramm und leiten Sie aus dem Anstieg der Geraden die Beziehung zwischen p und V her.
- Führen Sie eine auswertende Diskussion einschließlich einer Grenzwertbetrachtung an Hand der Darstellung $p \cdot V = f(V)$ durch. Bestimmen Sie den Mittelwert sowie die Ober- und Untergrenze und tragen Sie diese mit in das Diagramm mit ein.
- Geben Sie die Messunsicherheit für einen ausgewählten Wert (z.B. $m=100$ g) durch eine Fehlerrechnung (*absolut und relativ*) an.

Aufgabe 2: Bestimmung des Volumens als Funktion der Temperatur

- Stellen Sie die Funktion $V = f(\vartheta)$ in einem Diagramm graphisch dar.
- Tragen Sie die Regressionsgerade ein, bestimmen Sie deren Anstieg und schätzen Sie die relative Messunsicherheit durch Antragen der Fehlerbalken ab.
- Ermitteln Sie graphisch in einem gesonderten V - ϑ -Diagramm der Funktion $V = f(\vartheta)$ den absoluten Nullpunkt.
- Ermitteln Sie unter Verwendung des Ergebnisses der Regressionsrechnung den Volumenausdehnungskoeffizienten γ einschließlich der Messunsicherheit durch eine Fehlerrechnung.
- Vergleichen und diskutieren Sie ihr Ergebnis mit dem Tabellenwert ($\gamma_{Luft} = 3,548 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$).

3. Ergänzung

3.1 Zusätzliche Betrachtungen

zur Aufgabe 2 der Vorbetrachtung

$\vartheta / ^\circ\text{C}$	0	20	35	50	65	80	100
x / mm	172	184	193	202	211	221	233

Wertetabelle

zur Aufgabe 1a: Nachweis des Hookeschen Gesetzes

Für die Bestimmung der Kraft F ergibt sich aus der Versuchsanordnung und der Gleichung (2) folgender Zusammenhang:

$$\frac{F}{A_{\text{Kap}}} = \frac{F_{\text{Kolben}}}{A_{\text{Kolben}}} + \frac{F_{\text{Gew}}}{A_{\text{Kolben}}} \quad (6)$$

zur Aufgabe 1b: Nachweis des Boyle-Mariotteschen Gesetzes

Der auf der Luftsäule unter dem Quecksilbertropfen wirkende Druck p ergibt sich aus einer Summe verschiedener Drücke. Dazu gehören der Luftdruck p_L , der Schweredruck des Quecksilbertropfens p_{Hg} , der Druck des Kolbens p_{Kolben} sowie der Druck der Auflagegewichte p_{Gew} . So ergibt sich:

$$\Delta p = p_{\text{Hg}} + p_{\text{Kolben}} + p_{\text{Gew}}$$

Δp : relativer Druck auf die Luftsäule unter dem Quecksilbertropfen

- Schweredruck des Quecksilbertropfens

$$p_{\text{Hg}} = \frac{m_{\text{Hg}} \cdot g}{A_{\text{Kap}}}$$

Messgröße: Länge des Quecksilberfadens h_{Hg}

- Kolbendruck

$$p_{\text{Kolben}} = \frac{m_{\text{Kolben}} \cdot g}{A_{\text{Kolben}}}$$

Messgrößen: m_{Kolben} , A_{Kolben}

- Differenzdruck

$$p_{\text{Gew}} = \frac{m_{\text{Gew}} \cdot g}{A_{\text{Kolben}}}$$

m_{Gew} : Masse der Auflagegewichte

$$p = p_L + \Delta p$$

p : absoluter Druck auf die Luftsäule unter dem Quecksilbertropfen

Das eingeschlossene Gasvolumen V ergibt sich aus Gleichung (1):

$$V = A_{\text{Kap}} \cdot x .$$

3.2 Sammeln des Quecksilbers und Einstellung eines Gasvolumens

Ein Kolbenprober (*Bild 2, rechts*) ist mit einem Schlauch an der Olive des Gasthermometers angeschlossen. Ein intakter Quecksilbertropfen lässt sich durch Erzeugung von Unterdruck mittels des Kolbenprobers in die kleine Ausbauchung unter der Glasfritte bringen. Ist der Quecksilbertropfen in kleine Kügelchen zersprungen, so sind die Kügelchen durch zusätzliches leichtes Klopfen an der Kapillare in die Ausbauchung zu befördern. Ein einzelnes am unteren Skalenende des Gasthermometers hängendes Quecksilberkügelchen schadet bei den Messungen nicht.

Je nach Größe des gewünschten, neu einzustellenden Gasvolumens (*bei Umgebungsdruck*) ist mit dem Kolbenprober entsprechender Unterdruck einzustellen. Das Gasthermometer wird dabei mit dem unteren geschlossenen Ende nach oben gehalten. Durch langsames Kippen des unteren Endes nach unten ist jetzt der Quecksilbertropfen vorsichtig in den Eingang der Kapillare zu bringen. Wird der Kolbenprober nun entspannt, verschiebt sich der Quecksilbertropfen in der Kapillare und nimmt schließlich seine Ruhelage bei Umgebungsdruck an. Gegebenenfalls ist diese Prozedur mehrere Male zu wiederholen.

Achtung:

Diese Prozedur ist nur vom Betreuer durchzuführen!