

## GASTHERMOMETER

NP

Der Versuch setzt sich mit grundlegenden Eigenschaften und Verhaltensweisen von Gasen als einfachstem Aggregatzustand und dem idealen Gas als einfachster Modellvorstellung auseinander.

Darüber hinaus verdeutlicht der Versuch am Beispiel der Temperaturskala in exemplarischer Weise das Problem der Definition und praktischen Realisierung einer Maßeinheit und Einheitenskala. Die Apparatur stellt einen Aufbau dar, mit dem direkt aus der Definition der Temperatureinheit Temperaturen gemessen werden können.

Temperaturen von  $-30\text{ °C} \approx 243\text{ K}$  bedeuten nur für den Menschen und die biologische Umwelt Eiseskälte; physikalisch gesehen ist dies dagegen eine Temperatur, bei der das Verhalten physikalischer Systeme nicht grundsätzlich anders als bei 200 oder 300 K ist. Charakteristische Tieftemperatur-effekte (z.B. die Supraleitung) treten erst unterhalb von 160 K auf. Man kann sich heute dem absoluten Nullpunkt mit aufwendigen Apparaturen bis auf einige  $\mu\text{K}$  (Mikrokelvin) nähern. Ganz erreichen kann man ihn aber nie; das besagt der so genannte 3. Hauptsatz der Thermodynamik.

## Aufgaben

- (Zimmertemperatur) Messung der Zimmertemperatur mit dem Gasthermometer und Vergleich mit der Anzeige eines Quecksilberthermometers.
- (Spannungskoeffizient) Bestimmung des Spannungskoeffizienten von Luft.

## Physikalische Grundlagen

## Zustandsgleichung des idealen Gases

Modellvorstellungen können durch ihre physikalischen Voraussetzungen oder durch die daraus folgenden (mathematischen) Gesetzmäßigkeiten charakterisiert werden. Ein *ideales Gas* ist formal dadurch definiert, dass der Zusammenhang zwischen den Zustandsgrößen Temperatur ( $T$ ), Druck ( $p$ ) und Volumen ( $V$ ) der *Zustandsgleichung des idealen Gases* genügt:

$$(1) \quad pV = nRT,$$

wobei  $n$  die Stoffmenge und  $R$  die *allgemeine Gaskonstante* ist, eine für Gase universelle Konstante.

In der *physikalischen Vorstellung* besteht ein ideales Gas aus einer Menge von Massepunkten (d.h. Teilchen *ohne Eigenvolumen*), zwischen denen *keine Wechselwirkung* besteht (im Sinne damit verbundener potentieller Energie), und die bei ihrer Bewegung *elastische Stöße* untereinander und mit der Gefäßwand vollziehen (was gedanklich eine Wechselwirkung voraussetzt), so dass für die Teilchen insgesamt eine zufällige Bewegungsform entsteht.

Verwendet man an Stelle der Stoffmenge direkt die Anzahl  $N = n N_A$  der Teilchen (mit  $N_A = \text{Avogadro-Konstante} \approx 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ), so heißt die Zustandsgleichung des idealen Gases:

$$(2) \quad pV = N \frac{R}{N_A} T = NkT.$$

Dabei ist  $k = R/N_A$  die universelle *Boltzmann-Konstante* ( $k = 1,3806503 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ).

Bei kleinen Dichten und hohen Temperaturen erfüllen reale Gase in guter Näherung die Zustandsgleichung (1). Abweichungen von diesem Verhalten treten erst nahe dem Kondensationsbereich auf, bei dem wegen der hohen Dichte und engen Nachbarschaft der Teilchen das Eigenvolumen und die Wechselwirkung der Gasteilchen untereinander nicht mehr vernachlässigt werden können.

## Temperatureinheit und Temperaturskala

Aus der Zustandsgleichung (1) ergibt sich, dass die Temperatur nur positive Werte annehmen kann und allenfalls ein Nullpunkt  $T = 0$  mit  $p = 0$  und  $V = 0$  existiert. Die auf diesen Nullpunkt aufbauende Temperaturskala wird als absolute oder *thermodynamische Temperaturskala* bezeichnet.

Die Definition der Temperaturskala innerhalb des SI-Einheitensystems bezieht sich auf den absoluten Charakter der Temperatur, wobei aus praktischen Gründen die historische Einheit  $1\text{ °C}$  (Grad Celsius) der gebräuchlichen, relativen Celsius-Skala übernommen wurde. Als Definitionspunkt wurde der *Tripelpunkt* des Wassers gewählt und zur Anpassung an die Celsius-Einheit auf  $273,16\text{ K}$  festgelegt (Einheitenname 1 Kelvin (K) ohne Grad-Bezeichnung).

Das wissenschaftliche Temperaturmaß ist das Kelvin, während die im Alltag gebräuchlichen Thermometer in Celsius-Graden kalibriert sind, so dass praktisch beide Skalen nebeneinander verwendet werden. Die beiden *Einheiten* ( $1\text{ °C}$  bzw.  $1\text{ K}$ ) sind aber gleich, so dass Temperaturdifferenzen wegen

der Unabhängigkeit von der Skala stets in Kelvin angegeben werden; z.B.:

$$(3) \quad 26,7\text{ °C} - 16,4\text{ °C} = 10,3\text{ K}!$$

Der Zusammenhang zwischen den Skalen ist festgesetzt durch:

$$(4) \quad T/\text{K} = t/\text{°C} + 273,15,$$

(wobei zur Unterscheidung absolute Temperaturen mit  $T$  und relative Celsius-Temperaturen mit  $t$  geschrieben werden). Der Schmelzpunkt von Eis liegt dann bei  $0\text{ °C}$  (bei dem Normaldruck von  $1013\text{ hPa}$ ) und der Tripelpunkt von Wasser bei  $0,01\text{ °C}$ .

## Praktische Realisierung der Temperatureinheit

Wegen der Unerreichbarkeit des absoluten Nullpunkts und wegen des nichtlinearen Verhaltens aller realen Thermometersubstanzen wurde zur praktischen Verwirklichung der Temperatureinheit die Definition durch weitere sogenannte *Fixpunkte* der internationalen praktischen Temperaturskala ergänzt. Einige sind die Siedepunkte von Wasserstoff ( $20,28\text{ K}$ ), von Sauerstoff ( $90,188\text{ K}$ ) und von Wasser ( $373,15\text{ K}$ ) sowie die Schmelzpunkte von Silber ( $1235,08\text{ K}$ ) und von Gold ( $1337,58\text{ K}$ ), jeweils bei Normaldruck ( $1013\text{ hPa}$ ).

## Gasgesetze und Spannungskoeffizient

Gleichung (1) enthält vier freie Variablen ( $n, p, V, T$ ). Bezieht man sich (sinnvollerweise) auf eine gleichbleibende Gasmenge ( $n = \text{const}$ ) und hält zusätzlich eine weitere Variable fest, so ergeben sich die speziellen Gasgesetze, die (in der Literatur z.T. unterschiedlich bezeichnet) unter den Namen BOYLE-MARIOTTE, GAY-LUSSAC und CHARLES bekannt sind:

$$p \sim \frac{1}{V}; \quad V \sim T \quad \text{und} \quad p \sim T.$$

Die letzte Proportionalität besagt, dass (bei konstant gehaltenem Volumen) ein durch den Nullpunkt gehender, linearer Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur besteht. Die Transformation dieses Zusammenhanges in die Celsius-Skala verschiebt die Ordinate zu der Temperatur  $T = 273,15\text{ K}$  mit  $t = 0\text{ °C}$  als neuem Nullpunkt und  $p_0$  als Achsenabschnitt. Für die Steigung der Geraden folgt daraus der Wert  $p_0/(273,15\text{ K})$  (siehe Abb. 1).

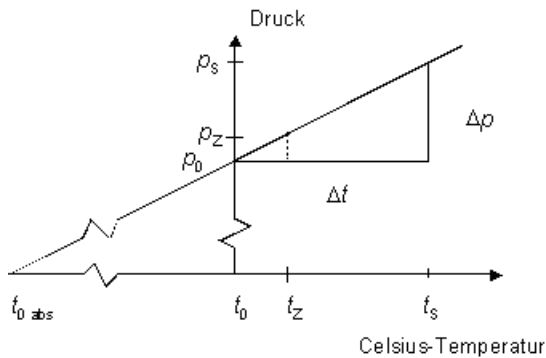


Abb. 1  $p$ - $t$ -Gesetz ( $t$ -Achse nach links nicht maßstäblich).

Der Schmelzpunkt  $(t_0, p_0)$  und der Siedepunkt  $(t_s, p_s)$  sind Fixpunkte und Messpunkte zur Festlegung der Temperaturskala. Der Punkt  $(t_z, p_z)$  gehört zur Zimmertemperatur. Die Versuchsauswertung basiert auf den eingetragenen Steigungsdreiecken.

Als transformierte Geradengleichung folgt damit:

$$p = p_0 + \frac{p_0}{273,15 \text{ K}} t$$

$$= p_0 \left( 1 + \frac{1}{273,15 \text{ K}} t \right)$$

$$(5) \quad = p_0 (1 + \beta t).$$

Der Faktor  $\beta$  heißt *Spannungskoeffizient*. Er wird auch zur Beschreibung realer Gase oder anderer Substanzen herangezogen. Für ein ideales Gas beträgt sein Wert  $1/(273,15 \text{ K}) \approx 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

### Versuchsdurchführung

Die Apparatur besteht aus einem abgeschlossenen Volumen (Messkugel aus Glas), das mit einem *offenen* Quecksilbermanometer verbunden ist, mit dem *Druckdifferenzen*  $\Delta p$  zum Außendruck gemessen werden können. (Die Druckdifferenz ist proportional zur Höhendifferenz der Quecksilbersäulen, d.h. zur Differenz der Quecksilber-Oberflächen in den beiden

Schenkeln.) Das Volumen in der Kugel wird konstant gehalten, indem man den offenen Schenkel des Manometers in der Höhe so einstellt, dass sich die Quecksilber-Oberfläche (*Meniskus*) in dem mit der Messkugel verbundenen Schenkel immer gleich auf eine durch eine Marke vorgegebene Höhe einstellt (oberste 35 cm-Ringmarke). Absolute Druckwerte  $p$  erhält man dann durch Addition des (atmosphärischen) Außendrucks, der mit einem elektrischen (Digital-) Barometer gemessen werden kann.

### Zu Aufgabe 1: Zimmertemperatur

Die Versuchsdurchführung beginnt mit der Messung der Druckdifferenz in der Kugel  $\Delta p_z$  zum Außendruck bei Zimmertemperatur, da sich die Apparatur zu Beginn noch insgesamt auf Zimmertemperatur befindet. Die Zimmertemperatur wird später (nach Messung des Eispunktes und des Siedepunktes) aus dem Verhältnisansatz zwischen den gemessenen Druckdifferenzen zu den zugehörigen Temperaturdifferenzen bestimmt (siehe Steigungsdreiecke in Abbildung 1), wobei sich die Druckdifferenzen ohne Berücksichtigung des Außendrucks direkt aus den Höhendifferenzen des Quecksilbermanometers ergeben.

### Zu Aufgabe 2: Spannungskoeffizient

Zur Bestimmung des Spannungskoeffizienten werden die Druckdifferenzen in der Messkugel für zwei Fixpunkte gemessen, nämlich  $\Delta p_0$  am *Schmelzpunkt* von Eis bei  $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $\Delta p_s$  am *Siedepunkt* des Wassers bei der Siedetemperatur  $T_s$ . Der Schmelzpunkt wird durch ein Eis-Wasser-Gemisch realisiert. Der Siedepunkt des Wassers ist vom Außendruck abhängig. Der Zusammenhang zwischen Druck und Siedetemperatur ist im Platzskript angegeben.

Zur Versuchsdurchführung kann die Messkugel in einem Becherglas mit einem Eis-Wasser-Gemisch bzw. durch Erwärmen auf einer Heizplatte mit siedendem Wasser umgeben werden. Bei der Messung mit dem Eis-Wasser-Gemisch muss zunächst das Becherglas um die Messkugel gebracht, und dann das Gemisch eingefüllt werden, um die Apparatur nicht zu beschädigen!

Der Spannungskoeffizient ist nach (5) die durch  $p_0$  dividierte Steigung, der direkt aus dem Steigungsverhältnis durch die beiden Fixpunkte hervorgeht. Die Auswertung erfolgt *rein rechnerisch*; eine grafische Auswertung wäre hier falsch bzw. unangemessen, da die Messung auf den zwei Fixpunkten als Definitionsmenge einer Geraden beruht und nicht auf einer (statistischen) Überprü-

fung eines funktionalen Zusammenhangs durch eine Messreihe. (Grafische Auswertungen sind ein visuelles Verfahren zur ausgleichenden Auswertung statistischer Daten.)