

Anleitung zum Praktikumsversuch

Temperatur und Druck

Zusammenfassung

In diesem Versuch werden Methoden zur Messung der thermodynamischen Zustandsgrößen Temperatur und Druck in einer Reihe verschiedener Experimente untersucht.

Zur Temperaturmessung werden dabei ein Digitalthermometer, ein klassisches Flüssigkeitsthermometer, ein Thermoelement mit zugehörigem Multimeter sowie ein handelsüblicher Temperatursensor aus der Kfz-Technik verwendet. Außerdem wird die Temperaturabhängigkeit des Widerstands von Metallen mit Hilfe einer Glühlampe vermessen.

Mit einem einfachen, an einer großen Flasche angebrachten wassergefüllten U-Rohr wird im zweiten Teil des Versuchs die Höhenabhängigkeit des Luftdrucks in der Erdatmosphäre untersucht. Dabei kommt das ideale Gasgesetz zur Anwendung.

In der Auswertung werden grundlegende physikalische Eigenschaften von Gasen und Festkörpern ermittelt, auf denen die einzelnen Messverfahren beruhen.

Wichtige Begriffe

Ideales Gas, Druck, Temperatur, Dichte, Fluid, Zustandsgrößen, Thermometrie, Barometrische Höhenformel, elektrischer Widerstand in Metallen und Halbleitern

Literatur

- Hering, Martin, Stohrer: Physik für Ingenieure, Springer, 11. Auflage (2012)
Kuypers : Physik (Band 1), Wiley VCH, 2. Auflage (2002)
Müller : Thermodynamik, De Gruyter, 1. Auflage (2014)

1 Grundlagen

1.1 Temperatur-Messung (Thermometer)

Die Zustandsgröße Temperatur kann heute mittels unterschiedlichster Methoden bestimmt werden. Ihre physikalische Wirkungsweise macht die Thermometer in verschiedenen Temperaturbereichen einsetzbar. Das bekannteste Thermometer ist das Flüssigkeitsthermometer, bei dem die durch die Temperaturerhöhung verursachte Ausdehnung der Flüssigkeit (z.B. Alkohol oder Quecksilber) gemessen wird.

$$l(T) = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta) \quad (1)$$

Hierbei ist l_0 die Länge der Flüssigkeitssäule bei $\vartheta = 0^\circ\text{C}$ und α der Längenausdehnungskoeffizient der Flüssigkeit.

Thermoelemente dagegen nutzen den Seebeck-Effekt zur Temperaturmessung. Sie bestehen aus zwei verschiedenen metallischen Leitern, die im Kontakt zueinander sind. Liegen an der Kontaktstelle und einer Vergleichsstelle unterschiedliche Temperaturen vor, so ergibt sich eine materialspezifische Thermospannung, die für Thermoelemente mit geeigneter Kombination der zwei metallischen Leiter eine robuste Messung über einen großen Temperaturbereich ermöglichen. Voraussetzung ist, dass die Temperatur der Vergleichsstelle bekannt ist. Das ist häufig die Temperatur im Messgerät selbst.

Mit Hilfe einer elektrischen Widerstandsmessung kann mit Festkörpern wie Halbleitern oder Metallen die Temperatur bestimmt werden. Hierbei spielt der zugrunde liegende elektrische Leitungsmechanismus eine entscheidende Rolle. Als Folge der Bandstruktur nimmt in Halbleitern die elektrische Leitfähigkeit mit der Temperatur zu während sie in Metallen abnimmt.

Zwar erhöht sich in Metallen mit zunehmender Temperatur nicht die Ladungsträgerkonzentration doch nimmt die Streuung an Gitterschwingungen zu, wodurch schließlich die Leitfähigkeit abnimmt. Aus diesem Grund steigt der Widerstand einer Glühlampe bei Stromerhöhung.

In Halbleitern erhöht sich mit zunehmender Temperatur die Leitfähigkeit. Während bei niedrigen Temperaturen nur wenige Ladungsträger in das Leitungsband angeregt werden (quasi isolierendes Verhalten), werden bei Temperaturerhöhung auf Grund verschiedener Prozesse zunehmend Ladungsträger in das Leitungsband angeregt und können zur Leitfähigkeit beitragen. Bei niedrigen Temperaturen wird die Leitfähigkeit von dotierten Halbleitern durch die Aktivierung von Ladungsträgern aus dem

Dotierniveau dominiert (Abbildungen 1 und 2). Im Bereich höherer Temperaturen, wo eine größere Zahl der Elektronen den Sprung über die Energielücke, d.h. aus dem Valenz- in das Leitungsband, schaffen, werden die elektrischen Eigenschaften durch die intrinsische Leitfähigkeit bestimmt. Näherungsweise kann im intrinsischen Bereich die thermische Aktivierung der Ladungsträger angegeben werden durch:

$$R \propto \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2)$$

Hierbei ist k die Boltzmann-Konstante, R der elektrische Widerstand und E_g die Energielücke des Halbleiters.

Abbildung 1

Bänderschema eines n -dotierten Halbleiters, Majoritätsladungsträger sind hier Elektronen

CB = conduction band
VB = valence band
 E_F = Fermi-Energie

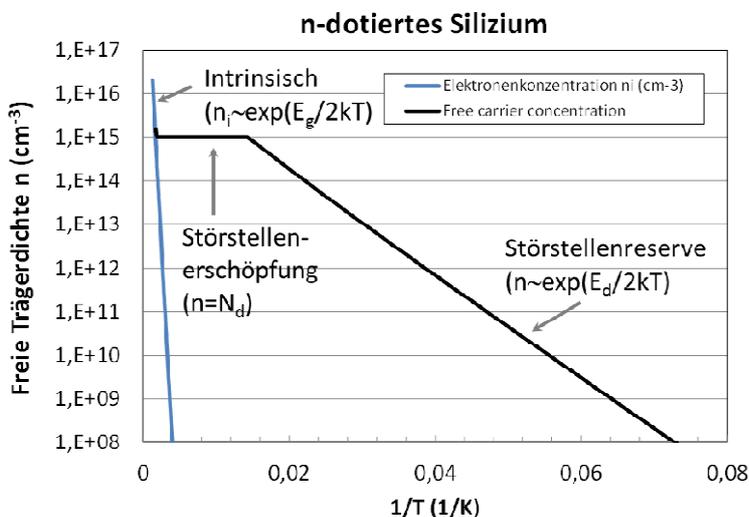
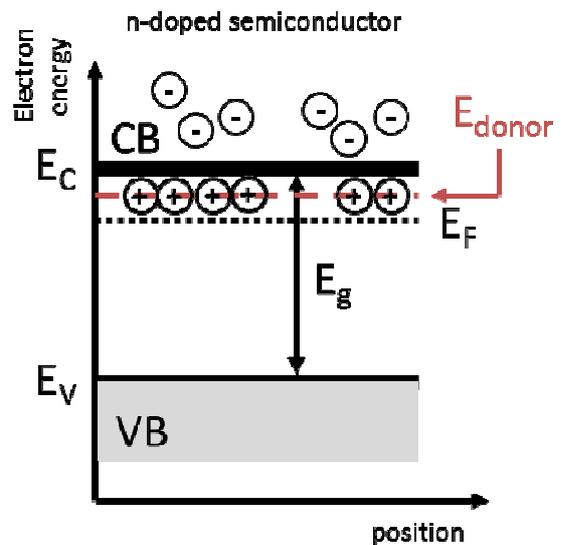


Abbildung 2

Ladungsträgerkonzentration eines n -dotierten Halbleiters (Silizium) als Funktion der reziproken Temperatur $1/T$

1.2 Druck-Messung (Manometer)

Mit Hilfe eines Manometers kann man den Druck in einem Fluid messen, also in einer Flüssigkeit oder einem Gas. Man unterscheidet zwei wesentliche Typen von Manometern: solche die den Luftdruck der Umgebung als Referenzdruck verwenden, und solche, die als Referenz ein Vakuum nutzen, um den absoluten Druck zu bestimmen. Ein solches Manometer bezeichnet man auch als Barometer. Manometer, bei denen man den Umgebungsdruck als Referenzdruck verwendet, sind meistens offene Manometer in Form eines U-Rohres.

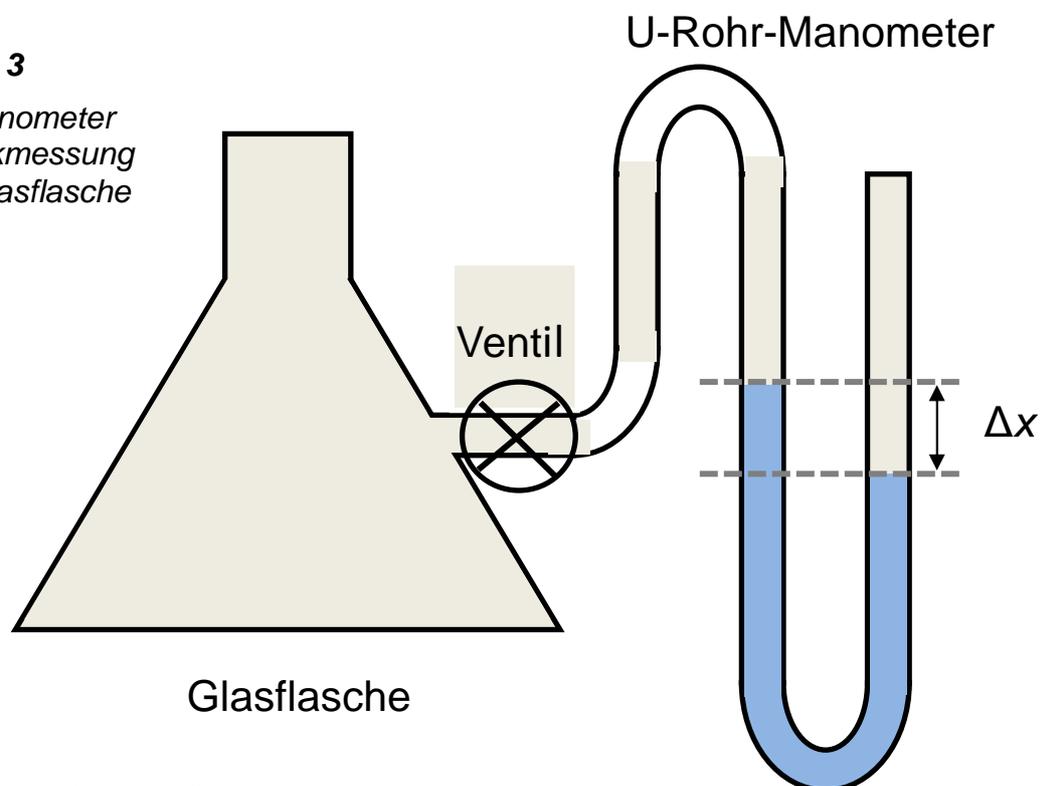
Im Laborversuch wird ein wassergefülltes U-Rohr-Manometer benutzt (Abbildung 3). Auch andere Flüssigkeiten (z.B. Öl oder Quecksilber) könnten verwendet werden. Liegt kein Druckunterschied zwischen Referenzvolumen und Außenluft vor, dann steht der Flüssigkeitsspiegel in beiden Schenkeln gleich hoch. Entsteht jedoch eine Druckdifferenz zwischen den beiden Schenkeln des U-Rohres, so verschiebt sich die Flüssigkeit im Rohr zu der Seite mit dem geringeren Druck. Durch Ablesen der Höhendifferenz Δx der Flüssigkeitsspiegel kann somit der Druckunterschied Δp bestimmt werden. Der Zusammenhang zwischen Höhendifferenz und Druckdifferenz ist:

$$\Delta p = \Delta x \cdot \rho \cdot g \quad (3)$$

Hierbei ist ρ die Dichte der Flüssigkeit und g die Erdbeschleunigung.

Abbildung 3

U-Rohr-Manometer zur Druckmessung an einer Glasflasche



1.3 Barometrische Höhenformel

Luft ist ein komprimierbares Gasmisch, dessen Druck von der darüber befindlichen Luftmasse abhängt. Die vertikale Verteilung der Gasteilchen in der Atmosphäre führt zu einer Abnahme des Luftdrucks mit der Höhe h über dem Erdboden, die durch die barometrische Höhenformel näherungsweise beschrieben wird:

$$p(h) = p_0 \cdot \exp\left(\frac{-h}{7990 \text{ m}}\right) \quad (4)$$

Hierbei ist mit p_0 der Luftdruck am Erdboden ($h = 0$), der, abgesehen von atmosphärischen Schwankungen, dem Normaldruck $p_N = 101325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$ entspricht.

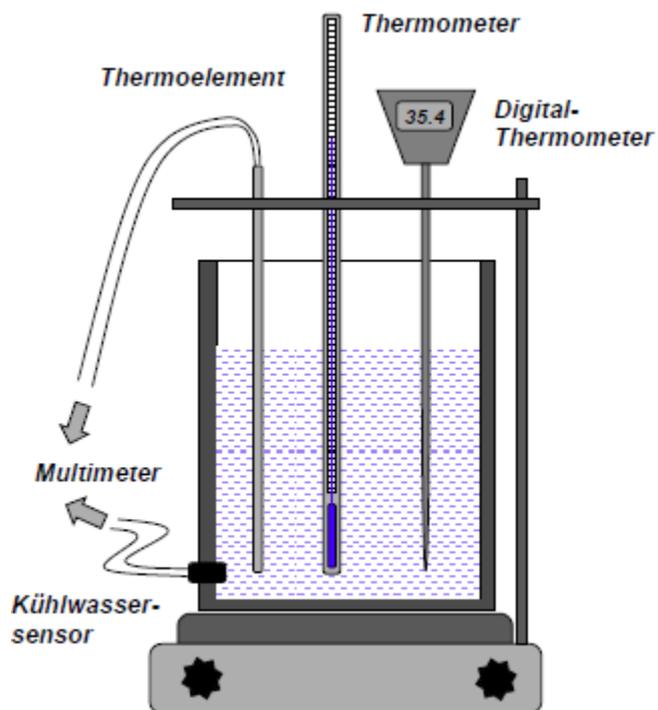
2 Messaufbau

2.1 Temperaturmessung mit verschiedenen Sensoren

Ein Topf ist mit verschiedenen Geräten zur Temperaturmessung versehen: klassisches Flüssigkeits- und Digitalthermometer sowie Thermoelement und Kühlwassersensor. Die beiden letzteren werden über Multimeter ausgelesen. Der Topf steht auf einem Magnetrührer mit Heizplatte und wird mit Wasser befüllt. Während des Aufwärmvorgangs werden die Anzeigewerte der einzelnen Messgeräte abgelesen und in einer Tabelle dokumentiert.

Abbildung 4

Aufbau: Wassertopf und Temperaturmessung



2.2 Luftdruckmessung an einer Glasflasche mit einem wassergefüllten U-Rohr-Manometer

Ein Luftvolumen befindet sich in einer druckdichten Glasflasche, an die ein U-Rohr-Manometer angebracht ist (siehe Abbildung 3). Mittels eines Ventils zwischen Glasflasche und Manometer kann ein Druckausgleich zwischen Außenraum und Flascheninnenraum hergestellt werden. Über die auftretende Höhendifferenz der Wassersäulen in den beiden Schenkeln des U-Rohr-Manometers kann die Druckdifferenz zwischen Außenraum und Flascheninnenraum gemessen werden.

2.3 Übersicht über die verwendeten Geräte

- Wassertopf mit Halter für verschiedene Thermometer
- Heizplatte
- Thermoelement
- Flüssigkeitsthermometer
- Digitalthermometer
- Kühlwassersensor
- IR-Laserthermometer
- Kfz-Glühlampe mit Netzteil
- 2 Multimeter
- Glasflasche mit U-Rohrmanometer in Styroporbehälter
- Digitalmanometer

3 Aufgaben

3.1 Temperaturabhängigkeit der Anzeige verschiedener Temperatursensoren

Ein mit Wasser gefüllter Topf wird auf einer Heizplatte erwärmt. In das Wasser tauchen verschiedene Geräte zur Temperaturmessung ein: Digitalthermometer, Flüssigkeitsthermometer, Thermoelement mit Multimeter und Kühlwassersensor. Zusätzlich steht ein kontaktlos arbeitender IR-Temperatur-Sensor zur Verfügung. Zu Beginn hat das Wasser Zimmertemperatur. Das Aufheizen wird bei einer Wassertemperatur von 70°C beendet. Während des Erwärmens werden in regelmäßigen Abständen (z.B. alle 5 min) Anzeigewerte aufgenommen (im Fall des Kühlwassersensors: der ohmsche Widerstand). Wichtig ist dabei das möglichst gleichzeitige Ablesen der einzelnen Messgeräte.

3.2 Aufnahme des Widerstands einer Glühlampe als Funktion der Heizleistung

Eine handelsübliche Kfz-Glühlampe ist an ein regelbares Netzteil angeschlossen. Mit Hilfe von zwei Multimetern ist der Stromfluss durch die Lampe in Abhängigkeit von der daran angelegten Spannung zu messen. Die Spannung wird dabei schrittweise von 0 V bis zur maximalen Betriebsspannung (also maximal 12 V) erhöht.

3.3 Höhenabhängigkeit des Luftdrucks

Eine Glasflasche in einer Styroporbox ist mit einem wassergefüllten U-Rohr-Manometer versehen. Der Deckel der Box ist abnehmbar. Durch kurzes Öffnen des Hahns an der Flasche kann ein Druckausgleich zwischen Außenraum und Flascheninnenraum hergestellt werden. Mit diesem Aufbau sind die Druckdifferenzen zwischen der untersten, einer mittleren und der obersten Etage des Hochschulgebäudes 2 zu ermitteln. Das Experiment findet unter Verwendung des Aufzugs statt. Zu Beginn erfolgt auf der untersten Etage ein Druckausgleich zwischen Außenraum und Flascheninnenraum. Dann wird die Anordnung im Aufzug in eine mittlere Etage und gleich darauf in die oberste Etage gefahren. Ohne weiteren Druckausgleich wird bei der Rückfahrt nochmals auf der mittleren und der untersten Etage gemessen. Die jeweils auftretenden Höhendifferenzen der Wassersäulen in den beiden Schenkeln des U-Rohr-Manometers werden abgelesen. Die Messungen werden insgesamt dreimal durchgeführt.

3.4 Temperaturabhängigkeit des Luftdrucks bei konstantem Volumen

In diesem Versuchsteil wird ebenfalls die Glasflasche aus 3.3 verwendet. Allerdings wird sie jetzt aus der Styroporbox herausgenommen. Nach Herstellen des Druckausgleichs zwischen Außenraum und Flascheninnenraum wird der Hahn geschlossen. Nun wird die Flasche durch Handauflegen erwärmt und die damit maximal erreichte Höhendifferenz der Wassersäulen in den Schenkeln des U-Rohr-Manometers abgelesen.

4 Auswertung

4.1 Thermometer und Thermoelement

Die abgelesenen Temperaturwerte der verschiedenen Temperaturmessgeräte werden gemeinsam in einem Diagramm gegen die Zeit aufgetragen. Schätzen Sie ab, wie genau demnach mit diesen Geräten die Temperatur gemessen werden kann.

4.2 Kühlwassersensor

Die in °C abgelesenen Temperaturwerte werden umgerechnet und der Widerstand des Sensors wird in einem Diagramm linear gegen die absolute Temperatur aufgetragen. Wie verändert er sich als Funktion der Temperatur ?

Da der Sensor aus Halbleitermaterial besteht, sollte die logarithmische Auftragung des Widerstands über dem Kehrwert der absoluten Temperatur nach der Theorie eine Gerade ergeben. Überprüfen Sie dies in einem entsprechenden zweiten Diagramm.

Legen Sie eine Ausgleichsgerade durch die Messpunkte und bestimmen Sie aus deren Steigung die thermische Aktivierungsenergie im Sensormaterial.

4.3 Kfz-Glühlampe

Berechnen Sie für jeden Messpunkt den Widerstand der Glühbirne und die jeweils von ihr aufgenommene elektrische Leistung. Tragen Sie den Widerstand gegen die Leistung in einem Diagramm auf. Wie verändert er sich als Funktion der Temperatur ?

4.4 Höhenabhängigkeit des Luftdrucks

Berechnen Sie aus den gemessenen Druckdifferenzen den Höhenunterschied zwischen unterster und oberster Etage sowie zwischen unterster und mittlerer Etage (als Mittelwerte aus jeweils sechs Einzelwerten). Geben Sie die zugehörige Messunsicherheit an !

4.5 Temperaturabhängigkeit des Luftdrucks

Berechnen Sie die maximale durch Handauflegen erreichte Druckdifferenz. Welche Temperaturänderung hat sich demnach in der Flasche ergeben ?

Generelle Bemerkung zu den grafischen Auswertungen:

Die Diagramme mit – wo sinnvoll - Ausgleichs- und Fehlergeraden können von Hand erstellt werden. Alternativ kann ein grafikfähiges PC-Programm mit linearer Regression wie etwa EXCEL verwendet werden. Wird eine Ausgleichsgerade ausgewertet, ist auch die Unsicherheit für ihre Steigung und das daraus ermittelte Resultat zu bestimmen.