

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W1
Institut für Physik	Dampfdruck	Seite 1

1. Aufgabenstellung

- 1.1. Die Dampfdruckkurve von Wasser ist im Temperaturbereich zwischen 100°C und 80°C aufzunehmen. Aus den Messwerten ist die molare Verdampfungsenthalpie zu ermitteln.
- 1.2. Aus der Differenz der Siedetemperatur von Wasser in zwei verschiedenen Etagen des Faraday-Baus ist die zugehörige Höhendifferenz zu berechnen.
- 1.3. Zum Vergleich ist dieselbe Höhendifferenz aus Barometerablesungen zu bestimmen.

2. Grundlagen

2.1. Befindet sich eine Flüssigkeit in einem geschlossenen, zuvor evakuierten Gefäß, dann verdampft ein Teil davon und es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen flüssiger und gasförmiger Phase ein. Der Dampfdruck über der Flüssigkeit heißt Sättigungsdampfdruck p_s und hängt nur von der Temperatur T (und natürlich vom Stoff selbst), nicht aber vom Volumen des Dampfraumes ab. Trägt man die bei verschiedenen Temperaturen gemessenen Dampfdrücke gegen die Temperatur in einem Diagramm auf, erhält man die sogenannte Dampfdruckkurve: die Grenzlinie zwischen flüssiger und gasförmiger Phase im Phasendiagramm. Diese Dampfdruckkurve lässt sich mit Hilfe der Gleichung nach *Clausius-Clapeyron* berechnen:

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{Q_{m,v}}{T(V_{m,G} - V_{m,Fl})} \quad (1)$$

$V_{m,G}$ und $V_{m,Fl}$ bedeuten hierbei die Molvolumina im gasförmigen bzw. flüssigen Zustand und $Q_{m,v}$ die für das Verdampfen eines Mols Flüssigkeit benötigte Verdampfungswärme. Bei isobarer und isothermer Prozessführung entspricht $Q_{m,v}$ der molaren Verdampfungsenthalpie ΔH_v , die für ein schmales Temperaturintervall als konstant angenommen werden kann.

Hinreichend weit unterhalb des kritischen Punktes ist das molare Volumen der gasförmigen Phase deutlich größer als das der flüssigen und somit $V_{m,G} - V_{m,Fl} \approx V_{m,G}$. Man erhält demnach:

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{\Delta H_v}{T \cdot V_{m,G}}, \quad (2)$$

Nimmt man des Weiteren an, dass die gasförmige Phase sich wie ein ideales Gas verhält, d.h. $p_s \cdot V_{m,G} = R \cdot T$, so folgt:

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{\Delta H_v}{R} \frac{p_s}{T^2}, \quad (3)$$

und nach Integration mit den Anfangsbedingungen $p_{s,0} = p_s(T_0)$ erhält man schließlich:

$$p_s(T) = p_{s,0} \exp \left[-\frac{\Delta H_v}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]. \quad (4)$$

2.2. Eine Flüssigkeit siedet, wenn ihr Sättigungsdampfdruck p_s gleich dem umgebenden Luftdruck p_L ist. Wegen der Höhenabhängigkeit des Atmosphärendrucks wirkt sich diese Tatsache beispielsweise auf

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W1
Institut für Physik	Dampfdruck	Seite 2

die Siedetemperatur und somit die Garzeit von Speisen im Hochgebirge aus. Präzise Messungen der Siedetemperatur T_s erlauben somit auch die Bestimmung von Höhendifferenzen.

Eine Höhenänderung ruft wegen des Schweredruckes der Luft eine Luftdruckänderung hervor:

$$dp_L = -\rho_L g dh = -\frac{\rho_L M}{RT} g dh \quad (5)$$

wobei ρ_L die Luftdichte und M die Molmasse bezeichnet. Die Integration dieser Gleichung führt zur barometrischen Höhenformel. Für geringe Höhenunterschiede Δh ist die Luftdichte $\rho_L \approx \text{const}$ und die Änderung der Siedetemperatur $\Delta T_s \ll T_s$, so dass in (2) und (5) die Differentiale durch endliche Differenzen ersetzt werden können. Man erhält somit

$$\Delta p_s = \frac{\Delta H_v \rho_L}{R T_s^2} \Delta T_s \quad (6)$$

und

$$\Delta p_L = -\frac{\rho_L M}{R T_L} g \Delta h. \quad (7)$$

T_L ist die konstant angenommene Lufttemperatur. Wenn die Flüssigkeit siedet, ist $p_s = p_L$, somit gilt auch $\Delta p_s = \Delta p_L$, so dass (6) und (7) gleichgesetzt werden können. Man erhält schließlich einen Zusammenhang zwischen (geringer) Höhenänderung und Änderung der Siedetemperatur:

$$\Delta h = -\frac{\Delta H_v T_L}{M g T_s^2} \Delta T_s. \quad (8)$$

3. Messanleitung

3.1. Zur experimentellen Bestimmung der Dampfdruckkurve wird Wasser in einem verschließbaren Glaskolben mit eingebautem Digitalthermometer von einem elektrischen Heizgerät erhitzt. Der Schraubanschluss für das Digitalbarometer bleibt zunächst offen, so dass nach Siedebeginn die eingeschlossene Luft und ein Teil des Wasserdampfes entweichen können. Die im Glaskolben befindlichen Siedesteinchen sollen einen Siedeverzug verhindern.

Nach Abschalten der Heizung wird der Kolben etwa 5 cm über der Heizung befestigt und seine Position im Verlauf der Messung nicht mehr geändert. Mit Beginn der Abkühlung schraubt man den Anschluss des Digitalbarometers fest. Das zwischen Dampfatmosfera und Drucksensor befindliche Spiralrohr soll lediglich den Sensor vor Kondenswasser schützen. Während Druck und Temperatur im Kolben ständig sinken, siedet das Wasser leicht weiter. Zur Erfassung von p_s, ϑ -Wertepaaren wird der Arduino genutzt. Die Temperatur im Glaskolben wird durch den Temperatursensor direkt erfasst, zur Messung des Druckes nutzt man das Digitalbarometer. Dieses gibt den Druck aus seinem Wertebereich von 0..1300mbar in Form einer analogen Spannung zwischen 0..1V aus. Mit Hilfe des 10 Bit Analog-Digital Wandlers des Arduino wird diese erfasst und in einen Druck umgerechnet. Der Temperaturbereich zwischen 100°C und 80°C dient zur späteren Auswertung, der Arduino bildet einen Mittelwert aus 5 Messwerten und gibt diesen dann aus. Da der Arduino über eine serielle Schnittstelle kommunizieren kann, nutzen Sie bitte das Programm Terminal auf dem Rechner. Von diesem aus können sie die

Diese Versuchsanleitung ersetzt NICHT eine eigenständige Ausarbeitung des Grundlagenteils Ihres Versuchsprotokolls!

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W1
Institut für Physik	Dampfdruck	Seite 3

erfassten Messwerte speichern und zur späteren Berechnung zum Beispiel in MS Excel importieren. Ein Klick auf den Button löscht alle empfangenen Daten. Nach dem Klick auf den Button öffnet sich ein Dialogfenster und man kann einen Speicherort auswählen, an dem man die empfangenen Daten zur späteren Auswertung abspeichern möchte.

Die Auswertung erfolgt mit den umgerechneten Temperaturen auf der Grundlage von Gl. (4), wobei für $p_{s,0}$ und T_0 das erste Messwertpaar eingesetzt wird. Logarithmieren liefert $\ln(p_s/p_{s,0})$ als Funktion von $1/T$. Zur grafischen Darstellung und Berechnung des Anstiegs des erwarteten linearen Zusammenhangs kann das Praktikumsprogramm *PhysPract* verwendet werden. Dieses gibt zusätzlich zu den Geradenparametern auch die Standardabweichungen mit an. Aus dem Geradenanstieg lässt sich die molare Verdampfungsenthalpie ΔH_v berechnen.

3.2. Im Keller (Höhe h_1) und auf der obersten Etage (Höhe h_2) befinden sich Versuchsplätze, an denen Wasser in einem elektrisch beheizten Glaskolben zum Sieden gebracht wird. Die Differenz der Siedetemperaturen ΔT_s wird mit einem *Beckmann*-Thermometer gemessen. Es erlaubt die Ablesung von Temperaturdifferenzen bis maximal $5K$, wobei die Skala in $0,01K$ -Schritten ohne Bezug zu einem Fixpunkt geteilt ist. Das Thermometer ist so voreingestellt, dass die Siedetemperatur an den Versuchsplätzen in den Anzeigebereich fällt. Das *Beckmann*-Thermometer darf nicht aus seiner Halterung entfernt werden.

Es empfiehlt sich, das Wasser noch im Praktikumsraum auf Heizstufe 10 zum Sieden zu bringen. Danach wird die Heizleistung soweit wie möglich reduziert. Während des Siedens schwankt die Anzeige des Thermometers leicht, aus diesem Grund sind mindestens zehn Temperaturablesungen im Abstand von $15s$ zu notieren und zu mitteln. Die Differenz dieser Mittelwerte zwischen Keller und oberster Etage liefert die gesuchte Temperaturdifferenz ΔT_s . Die Höhendifferenz Δh ist nach (8) zu berechnen, hierbei werden verwendet:

- Molmasse $M = 28,96 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$
- Molare Verdampfungsenthalpie ΔH_v aus Versuchsteil 3.1
- Lufttemperatur T_l als Mittelwert der Ablesungen an den beiden Versuchsplätzen
- Siedetemperatur T_s durch direkte Messung oder aus der Dampfdruckkurve aus Versuchsteil 3.1 beim herrschenden Luftdruck im Praktikumsraum

3.3. In den Höhen h_1 und h_2 wird der Luftdruck mit einem Aneroid-Barometer gemessen. Die Druckänderung ist sehr gering, zehntel Millibar sollen daher noch geschätzt werden. Aus Δp_l und der mittleren Lufttemperatur berechnet man die Höhendifferenz Δh nach (7). Die Luftdruckdifferenz kann außerdem mit Hilfe der *Phyphox*-App auf dem Praktikums-Smartphone gemessen werden.

Die nach (7) und (8) berechneten Δh -Werte sind im Rahmen ihrer kombinierten Unsicherheiten mit der tatsächlichen Höhendifferenz von $15,25m$ zu vergleichen.

4. Kontrollfragen

1. Was ist der Sättigungsdampfdruck und wovon hängt er ab? Wann siedet eine Flüssigkeit?
2. Warum ist der äußere Luftdruck von der Höhe abhängig, in der man sich befindet?
3. Ein Eiswürfel hat eine Ausgangstemperatur von $-20^\circ C$ und eine Wärmequelle führt ihm konstant Energie zu. Wie sieht der zeitliche Verlauf der Temperatur der Probe aus?

Diese Versuchsanleitung ersetzt NICHT eine eigenständige Ausarbeitung des Grundlagenteils Ihres Versuchsprotokolls!

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W1
Institut für Physik	Dampfdruck	Seite 4

```
// Physikalisches Grundpraktikum Physik TU Ilmenau
// Versuch W1 Dampfdruck

#include <OneWire.h> //Einbinden der externen Bibliothek OneWire für Eindraht Sensoren
#include <DallasTemperature.h> //Einbinden der externen Bibliothek für DS18B20 Temperatursensoren
#define ONE_WIRE_BUS 2 //definiert Digital-Pin 2 für die Datenleitung

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS); //Richtet eine Instanz ein, um mit OneWire Geräten zu kommunizieren
DallasTemperature sensors(&oneWire); //Übergibt die OneWire Instanz an die Dallas Temperature Bibliothek

int analogPin = A0; //definiert Pin A0 zur Erfassung der Analogspannung vom Digitalbarometer
int n = 0; //Setzen von Zähler n auf 0
int ADValue = 0; //definiert den Wert des AD Wandlers als Integerzahl und setzt diese auf 0
float Druck = 0; //definiert den Wert des Drucks als Gleitkommazahl und setzt diese auf 0
float Temp = 0; //definiert den Wert der Temperatur als Gleitkommazahl und setzt diese auf 0

void setup(void)
{
  analogReference(EXTERNAL); //Nutzen der externen Referenzspannung
  Serial.begin(9600); //Initialisieren der seriellen Kommunikation
  sensors.begin(); //startet die Dallas Temperature Bibliothek
}

void loop()
{
  n = n + 1; //Zähler für Mittelwertbildung
  ADValue = analogRead(analogPin); //liest das analoge Spannungssignal und wandelt es in einen 10bit Digitalwert
  Druck = ADValue/1023.0*1300.0+Druck; //Berechnung des Drucks aus 10bit Digitalwert
  sensors.requestTemperatures(); //Anfrage an alle Geräte am Bus
  Temp = sensors.getTempCByIndex(0)+Temp; //Befehl zum Abrufen der Temperaturmesswerte
  //man kann mehr als einen Sensor an den Bus anschließen, die 0 bezieht sich auf
  //den ersten Sensor

  if (n == 5 )
  {
    String MittelwTemp(Temp/n); //Mittelwertbildung der Temperatur aus 5 Messungen und Umwandlung in eine Zeichenkette
    MittelwTemp.replace(".",","); //ersetzen des "." durch ein ","
    String MittelwDruck(Druck/n); //Mittelwertbildung der Temperatur aus 5 Messungen und Umwandlung in eine Zeichenkette
    MittelwDruck.replace(".",","); //ersetzen des "." durch ein ","
    Serial.println(" Temperatur [C]: " + MittelwTemp + " Druck [mbar]: " + MittelwDruck); //Ausgabe der Werte
    Temp = 0; Druck = 0; n = 0; //Setzen von Temperatur, Druck, Zähler auf 0
  }
}
```

Die Erfassung der analogen Spannung als Ausgabe des Digitalbarometers erfolgt nicht direkt als absolut gemessener Wert, sondern als Vergleich mit einer Referenzspannung. Der Standardwert für diese Referenz beträgt beim Arduino 5V. Das Digitalbarometer gibt seinen Wertebereich von 0..1300 mbar in Form einer Spannung von 0..1 V aus, d.h. 1,3 mbar/mV. Würde man diese analoge Spannung mit der 5V Referenz des 10 Bit AD Wandlers des Arduino vergleichen, so ergäbe sich folgende Auflösung:

$$\frac{5 \text{ V}}{1023} = 4,89 \text{ mV}.$$

Das bedeutet, dass man die analoge Spannung in Stufen von 4,89 mV erfassen kann.

Mit dem Auflösungsvermögen des Digitalbarometers von $1,3 \frac{\text{mbar}}{\text{mV}}$ ergibt dies eine Auflösung des Druckes von 6,35 mbar.

Um die Messgenauigkeit noch zu erhöhen, nutzt man hier eine Referenzspannung von 1V. Somit ergibt sich am AD Wandler des Arduino eine Auflösung von:

$$\frac{1 \text{ V}}{1023} = 0,978 \text{ mV}$$

Mit der Auflösung des Digitalbarometers ergibt sich somit ein kleinster messbarer Schritt von 1,27 mbar.