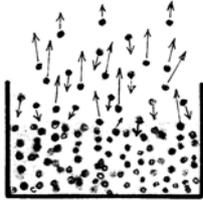


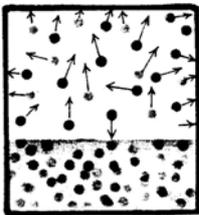
**1. ZIELE**

Wir atmen feuchtere Luft aus als ein. Müssen wir dafür Energie aufwenden? Warum werden die Kartoffeln in einem Dampfdrucktopf schneller gar? Was passiert, wenn Wasser verdampft? In diesem Versuch werden Sie den Dampfdruck und die Verdampfungswärme von Wasser bestimmen.

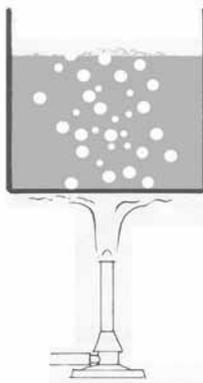
Stichpunkte für die Vorbereitung: Ideales Gas, Zustandsgrößen, allgemeine Gasgleichung, Zustandsänderungen, reale Gase, Phasenumwandlung.



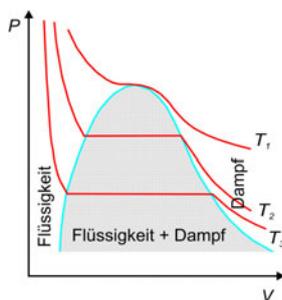
Die schnellsten Moleküle können entweichen. Das Wasser wird kälter.



Der Dampfdruck entsteht durch die thermische Bewegung der Moleküle.



Flüssigkeiten sieden, wenn ihr Dampfdruck gleich dem äußeren Luftdruck ist.



Isothermen im Wassertopf

**2. GRUNDLAGEN**

In einem *offenen* Gefäß verdunstet das Wasser nur allmählich. Die mittlere Geschwindigkeit der meisten Wassermoleküle reicht nicht aus, die anziehende Wirkung der Molekularkräfte zu überwinden. Die schnellsten Wassermoleküle schaffen es jedoch. Sie bilden ein Gas über dem Wasser, den Wasserdampf. Er diffundiert langsam in den Raum oder wird weggeblasen.

Was geschieht in einem *geschlossenen* Gefäß, in dem sich über dem Wasser zunächst ein Vakuum befindet? Die schnellsten Wassermoleküle werden wieder das Wasser verlassen, ein Bruchteil von ihnen wird aber im Lauf der Zeit auch in das Wasser zurückkehren. Es bildet sich schließlich ein dynamisches Gleichgewicht aus, bei dem im Mittel genauso viele Wassermoleküle die Flüssigkeit verlassen wie zurückkehren.

Den mit der Flüssigkeit im Gleichgewicht stehenden Dampf bezeichnet man als **gesättigten Dampf**. Der Druck, der im gesättigten Dampf herrscht, ist der **Sättigungsdampfdruck**.

**3. WOVON HÄNGT DER SÄTTIGUNGSDAMPFDRUCK AB?**

Erhöht man die Temperatur, so werden mehr Moleküle in der Lage sein, das Wasser zu verlassen. Ein neues Gleichgewicht ergibt sich erst wieder, wenn die Dampfdichte so weit angestiegen ist, bis wieder gleich viel Moleküle kondensieren wie verdampfen. Die Dichte des Dampfes und damit auch ihr Druck nehmen daher mit steigender Temperatur zu.

Vergrößert man das Volumen für den Dampf bei gleichbleibender Temperatur, so nimmt die Dichte des Dampfes zunächst ab. Dann aber werden mehr Moleküle die Flüssigkeit verlassen als zurückkehren, und zwar solange, bis der ursprüngliche Zustand für Druck und Dichte wieder erreicht ist. Verringert man das Volumen, so ...

Dieses Verhalten kann man im *pV*-Diagramm in der Abbildung links verfolgen. Der Druck des gesättigten Dampfes ist eine Parallele zur *V*-Achse, er hängt nicht vom Volumen ab. An der rechten Grenze ist alles Wasser verdampft, an der linken aller Dampf kondensiert.

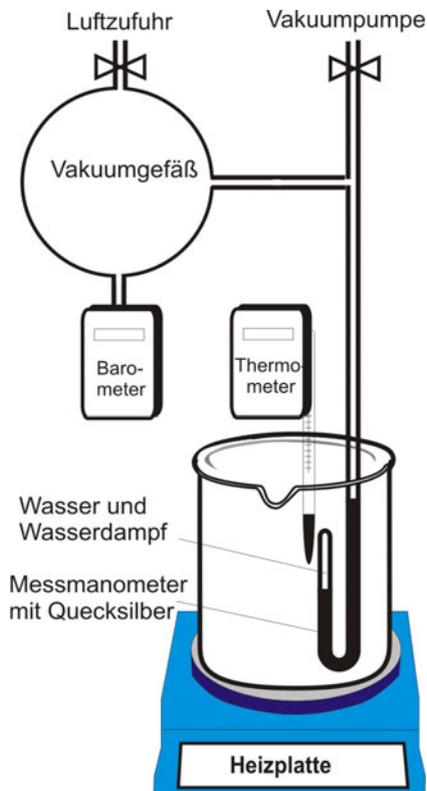
Der Druck des gesättigten Dampfes steigt mit zunehmender Temperatur; er ist aber unabhängig vom Volumen.

**Fragen:**

Welche Temperatur hat der Dampf über der Flüssigkeit?

Warum ist der Druck eines idealen Gases abhängig vom Volumen, der eines Dampfes jedoch nicht?

Was ändert sich, wenn in dem geschlossenen Gefäß über dem Wasser auch noch Luft vorhanden ist?

**4. VERSUCHSAUFBAU, MESSVERFAHREN**

So messen Sie die Abhängigkeit des Sättigungsdampfdrucks von der Temperatur:

In dem geschlossenen linken Schenkel des Messmanometers befindet sich etwas Wasser über dem Quecksilber. Zu Versuchsbeginn ist das Vakuumgefäß noch mit Luft gefüllt, in ihm herrscht der gleiche Druck wie im Labor (Hahn Luftzufuhr offen). Der Druck auf den rechten Schenkel des Messmanometers ist daher wesentlich größer als der Wasserdampfdruck auf den linken.

Die Quecksilbersäule wird daher vor Versuchsbeginn in den linken Schenkel hochgedrückt, Wasser und Wasserdampf sind bei Zimmertemperatur kaum zu sehen.

Wird das Vakuumgefäß ausgepumpt (Hahn Vakuumpumpe offen, Hahn Luftzufuhr geschlossen), so erniedrigt sich der Druck auf den rechten Schenkel des Messmanometers. Die Quecksilbersäule steigt rechts hoch. Sind die beiden Quecksilberkuppen auf gleicher Höhe, so herrscht auf beiden Seiten der gleiche Druck.

Bei diesem Gleichstand werden der Druck im Vakuumgefäß (= Sättigungsdampfdruck) und die Temperatur des Wassers (=Dampf Temperatur) gemessen.

**Messungen**

Nehmen Sie mindestens 5 Messwerte bis 50°C und 7 Messwerte zwischen 50°C und 85°C auf. Folgen Sie der Anleitung am Arbeitsplatz.

**Auswertung**

1. Stellen Sie graphisch Ihre gemessene Dampfdruckkurve  $p = p(T)$  zunächst auf Millimeterpapier dar. (Y-Achse: 50 mbar = 1 cm). Wie groß ist danach der Dampfdruck bei 20°C? Extrapolieren Sie Ihre Kurve auf 100°C. Wie groß ist Ihr Dampfdruck bei 100°C? Hängt Ihre Dampfdruckkurve von dem Luftdruck am Versuchstag ab?

2. Für den Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur des Dampfes gilt näherungsweise:

$$p = p_c e^{-\frac{Q_{mol}}{R T}} \quad Q_{mol} : \text{ molare Verdampfungswärme, } R: \text{ allgem. Gaskonstante}$$

Stellen Sie für Ihre Werte ab 40°C  $p$  als Funktion von  $1/T$  ( $T$  in K) auf halblogarithmischem Papier dar (finden Sie als pdf-file im Netz: Versuche / Graphen-Papier). Bestimmen Sie aus der Steigung der Ausgleichsgeraden die molare Verdampfungswärme  $Q_{mol}$  des Wassers. Vergleichen Sie bitte Ihren ermittelten Wert mit dem in der Literatur. Wofür wird diese Energie gebraucht? Wie viel Energie benötigt man danach, um 1 l Wasser zu verdampfen?

3. Wie groß ist der Fehler in der Druckmessung, wenn die Wassersäule im linken Schenkel 1 mm Höhe beträgt?

## 5. ZIELE

Unsere Luft enthält neben Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxyd, ... unter anderem auch stets einen Anteil Wasserdampf. Man sagt, die Luft ist feucht, obwohl der Wasserdampf in der Luft trocken und unsichtbar ist.

Es gibt verschiedene Messgeräte und Verfahren um die Luftfeuchtigkeit zu bestimmen:

Haarhygrometer,  
Taupunkthygrometer,  
Aspirationspsychrometer und  
elektronische Feuchtemesser.

Sie werden hier im Versuch das Taupunkthygrometer kennenlernen und die Ergebnisse mit denen eines elektronischen Feuchtemessers vergleichen. Bei dem letzteren misst man die Kapazität eines Kondensators, der ein hygroskopisches Dielektrikum besitzt. Dieses Dielektrikum nimmt je nach Luftfeuchtigkeit mehr oder weniger Wassermoleküle auf und ändert damit die Kapazität.

## 6. TAUPUNKTTEMPERATUR

Ständig verdunstet Wasser in die Atmosphäre. Luft kann aber nicht beliebig viel Wasserdampf aufnehmen. Sobald der Druck des Wasserdampfes  $p_{Dampf}$  den Wert des Sättigungsdampfdrucks  $p_{Sätt}$  erreicht, ist die Luft mit Wasserdampf gesättigt. Die dann in einem Kubikmeter Luft enthaltene Wasserdampfmenge nennt man

**Maximale Feuchtigkeit:**

$$f_{\max} = \frac{\text{max. mögliche Masse } m \text{ Wasserdampf im Volumen } V}{\text{Volumen } V, \text{ das den Wasserdampf enthält}} = \frac{m_{\max}}{V} = \rho_{Sätt}$$

Wie wir im vorigen Versuch gesehen haben, nimmt der Druck des gesättigten Dampfes mit sinkender Temperatur ab. Auch die maximale Feuchtigkeit wird daher mit sinkender Temperatur kleiner. Kalte Luft kann also nicht so viel Wasserdampf aufnehmen wie warme. Im Allgemeinen liegt die vorhandene Wasserdampfmenge erheblich unter der maximalen Feuchtigkeit. Die in einem Kubikmeter Luft tatsächlich enthaltene Wasserdampfmenge ist die

**Absolute Feuchtigkeit:**

$$f_{\text{abs}} = \frac{\text{Masse } m \text{ Wasserdampf im Volumen } V}{\text{Volumen } V, \text{ das den Wasserdampf enthält}} = \frac{m_{\text{tatsächlich}}}{V} \text{ in } \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right] = \rho_{Dampf}$$



Wenn Luftmassen aufsteigen werden sie abgekühlt. Unterhalb des Taupunktes bilden sich Wassertröpfchen oder Eiskristalle. Regnen sich die Wolken auf der Wetterseite ab, weht ein warmer, trockener Fallwind ins Tal.

Kühlt man die Luft ab, so ändert sich der in der Luft enthaltene Anteil an Wasserdampf nicht. Die Wasserdampfdichte  $\rho_{Dampf}$  bleibt konstant, aber der Sättigungsdampfdruck  $p_{Sätt}$  und die Sättigungsdampfdichte  $\rho_{Sätt}$  werden geringer. Beide hängen ja von der Temperatur ab. Kühlt man weiter ab, so erreicht man eine Temperatur  $\tau$ , bei der die Wasserdampfdichte  $\rho_{Dampf}$  gleich der Sättigungsdampfdichte  $\rho_{Sätt}$  wird. Unterschreitet man diese Temperatur, so kondensiert der überschüssige Wasserdampf. Es bilden sich Wassertröpfchen, Tau, Nebel und Wolken.

Man nennt diese Temperatur  $\tau$  Taupunkttemperatur oder kurz **Taupunkt**.

**7. WIE VIEL WASSERDAMPF IST IN DER LUFT?**

Dazu müssen Sie lediglich die Taupunkttemperatur hier im Versuch bestimmen. Die Abhängigkeit der Sättigungsdampfdichte  $\rho_{Sätt}$  von der Temperatur entnehmen Sie der Tabelle unten.

Beispiel: Sie messen bei der Zimmertemperatur  $T = 25^\circ\text{C}$  eine Taupunkttemperatur  $\tau = 10^\circ\text{C}$ .

Der Tabelle entnehmen Sie  $\rho_{Sätt}(\tau = 10^\circ\text{C}) = 9,4 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ . Da sich die Wasserdampfdichte beim Abkühlen nicht ändert, beträgt auch die tatsächliche Wasserdampfdichte im Zimmer

$\rho_{Dampf}(T = 25^\circ\text{C}) = 9,4 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = f_{abs}$ . In  $1 \text{ m}^3$  Luft sind  $9,4 \text{ g}$  Wasserdampf enthalten.

Üblicherweise gibt man statt der absoluten zumeist die relative Luftfeuchtigkeit  $f_{rel}$  an. Sie ist eher ein Wert, mit dem sich unser Wohlbefinden und unsere Abhängigkeit vom Wetter beschreiben lassen.

**Relative Luftfeuchtigkeit:**

$$f_{rel} = \frac{\text{absolute Feuchtigkeit}}{\text{maximale Feuchtigkeit}} \text{ (bei der Temperatur } T) = \frac{\rho_{Dampf}(T)}{\rho_{Sätt}(T)} = \frac{\rho_{Sätt}(\tau)}{\rho_{Sätt}(T)}$$

Beispiel: Mit den Werten von oben, Wasserdampfdichte  $\rho_{Dampf}(T = 25^\circ\text{C}) = \rho_{Sätt}(\tau = 10^\circ\text{C}) = 9,4 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$

und der Sättigungsdampfdichte  $\rho_{Sätt}(T = 25^\circ\text{C}) = 23,0 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ ,

ergibt sich :  $f_{rel} = \frac{9,4}{23,0} = 0,41$ . Die relative Luftfeuchtigkeit beträgt 41%.

**Dampfdruck  $p_{Sätt}$  und Dampfdichte  $\rho_{Sätt}$  von Wasser**

$\vartheta/^\circ\text{C}$	$p_{Sätt}/\text{mbar}$	$\rho_{Sätt}/\text{g m}^{-3}$
0	6,11	4,84
2	7,1	5,6
4	8,1	6,4
6	9,3	7,3
8	10,7	8,3
10	12,3	9,4
11	13,1	10,0
12	14,0	10,7
13	14,9	11,4
14	16,0	12,1
15	17,1	12,8
16	18,1	13,6
17	19,3	14,5
18	20,7	15,4
19	22,0	16,3
20	23,3	17,3
21	24,8	18,3

$\vartheta/^\circ\text{C}$	$p_{Sätt}/\text{mbar}$	$\rho_{Sätt}/\text{g m}^{-3}$
22	26,4	19,4
23	28,1	20,6
24	29,9	21,8
25	31,7	23,0
26	33,6	24,4
27	35,6	25,8
28	37,7	27,2
29	40,0	28,7
30	42,4	30,8
35	56,3	39,6
40	73,7	51,1
45	95,9	65,4
50	123,3	83,0
55	157,4	104,3
60	199,2	130,2
65	250,1	161,1
70	311,6	198,1
75	385,4	241,8

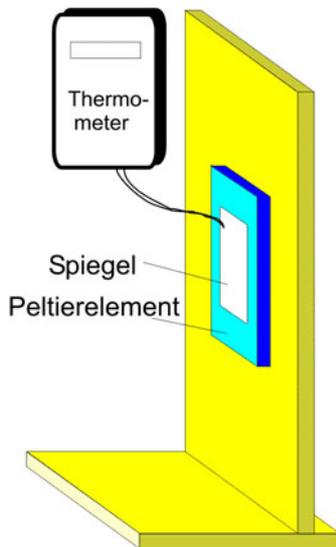
## 8. FRAGEN ZUR VORBEREITUNG

Ändert sich beim Abkühlen der Luft der Wasserdampfdruck, die Sättigungsdampfdichte?

Was ist und wie funktioniert ein Peltier-Element?

Kennen Sie den Zusammenhang zwischen Druck und Dichte von Wasserdampf?

## 9. VERSUCHSAUFBAU TAUPUNKTHYGROMETER



Auf einem Kühlaggregat (Peltier-Element) ist ein Spiegel aufgeklebt. Mit dem Netzgerät lässt sich der elektrische Strom durch das Peltier-Element regeln, dabei wird der Spiegel abgekühlt. Ist die Taupunkttemperatur erreicht, so beschlägt der Spiegel. Die Temperatur des Spiegels wird mit einem Thermometer gemessen.

### Messung

Schalten Sie den Strom für höchstens 10s auf 2A ein. Regeln Sie danach auf 1A und beobachten Sie den Spiegel. Beschlägt er? Regeln Sie bitte den Strom nach, um das Einsetzen der Taubildung möglichst genau zu bestimmen: Messpunkt  $T_1$ .

Regeln Sie danach den Strom auf Null. Wird der Spiegel wieder klar: Messpunkt  $T_2$ .

Als Taupunkttemperatur  $\tau$  dient das arithmetische Mittel beider Werte  $T_1$  und  $T_2$ .

Diese Messung sollte jeder von Ihnen beiden dreimal durchführen.

### Auswertung

Bestimmen Sie für den Mittelwert Ihres Taupunktes die absolute und die relative Luftfeuchtigkeit.

Wie viel Wasserdampf ist danach in  $1 \text{ m}^3$  Luft enthalten?

Wie groß ist der Partialdruck des Wasserdampfes?

## 10. MESSUNG MIT DEM ELEKTRONISCHEN FEUCHTEMESSER

Notieren Sie den Wert für die Luftfeuchtigkeit am Arbeitsplatz.

Ändert sich der Wert, wenn Sie im Flur, draußen, ... messen?

Wir atmen feuchtere Luft aus als ein. Wenn wir bei der relativen Feuchtigkeit von 41% einatmen, enthält  $25^\circ\text{C}$  warme Luft  $9,4 \text{ g}$  Wasserdampf in  $1 \text{ m}^3$  (Beispiel oben). Beim Ausatmen ist der Wert auf  $44 \text{ g}$  gestiegen (Sättigung bei  $37^\circ\text{C}$ ). Für diese zusätzliche Dampfmenge von  $34,6 \text{ g}$  wird dem Körper Wärme entzogen. In der Minute atmen wir etwa  $6 \text{ l} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  Luft und produzieren damit  $6 \cdot 10^{-3} \cdot 34,6 \text{ g} = 0,21 \text{ g}$  Dampf. Bei  $37^\circ\text{C}$  benötigt man ca.  $2400 \text{ J}$  um  $1 \text{ g}$  Wasserdampf zu erzeugen (Verdampfungswärme). Beim Ausatmen wird unserem Körper daher die Wärme  $Q = 2400 \text{ J g}^{-1} \cdot 0,21 \text{ g} = 504 \text{ J}$  pro Minute entzogen.

Diese Leistung  $Q = 504 \text{ J} / 60 \text{ s} = 8,4 \text{ W}$  ist etwa 10% unserer gesamten Wärmeabgabe in Ruhe.

Die Dampfdruckkurve hört nicht bei  $100^\circ\text{C}$  auf. Dampfturbinen arbeiten umso effektiver, je höher die Dampftemperatur ist. Da der Dampfdruck des Wassers aber bei  $300^\circ\text{C}$  bereits  $90 \text{ bar}$  beträgt, ist man durch die Festigkeit der Dampfkessel beschränkt.

Im Dampfdrucktopf zu Hause erreicht man bei etwa  $2 \text{ bar}$  eine Temperatur von  $120^\circ\text{C}$ . Durch die höhere Temperatur ist die kinetische Energie der Wassermoleküle größer und die Kartoffeln werden schneller gar.