

Versuchsnummer: 203

Verdampfungswärme

Konstantin Mrozik
konstantin.mrozik@udo.edu

Marcel Kebekus
marcel.kebekus@udo.edu

Durchführung: 03.12.2019

Abgabe: 10.12.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Mikroskopische Vorgänge	3
1.2	Verdampfungswärme L	4
1.3	Clausius-Clapeyronsche Gleichung	4
2	Durchführung	5
2.1	Aufbau	5
3	Auswertung	6
3.1	Niedrigdruckbereich	6
3.2	Hochdruckbereich	7
4	Diskussion	9
	Literatur	10

1 Theorie

Ziel: Bestimmung der Dampfdruckkurve im Bereich ca. 30-1000mbar. Zusätzlich soll die zugehörigen Verdampfungswärme L und dessen temperaturabhängigkeit bestimmt werden.

1.1 Mikroskopische Vorgänge

In einer Flüssigkeit bewegen sich die Teilchen mit der Maxwell'schen Geschwindigkeitsverteilung. Einige Moleküle haben genug kinetische Energie um die Flüssigkeit zu verlassen. Dabei verrichten sie Arbeit, dessen Energie von außen durch z.B. das Erhitzen hinzugefügt werden muss. Die Moleküle die wieder auf die Flüssigkeitsoberfläche treffen, können von dieser wieder eingefangen werden. Nach einer gewissen Zeit stellt sich ein Gleichgewicht zwischen den Molekülen, die die Flüssigkeit verlassen und denen, die wieder eingefangen werden ein. Es stellt sich ein konstanter Druck (Sättigungsdruck) ein. Dieser ist Gasraum-Volumen unabhängig. Der Vorgang der Verdampfung ist zu diesem Zeitpunkt beendet und die Flüssigkeit und der Dampf koexistiert.

Das Verhalten des gesättigten Dampfes entspricht der Allgemeinen Gasgleichung:

$$pV = RT \quad (1)$$

wobei R die Allgemeine Gaskonstante ist.

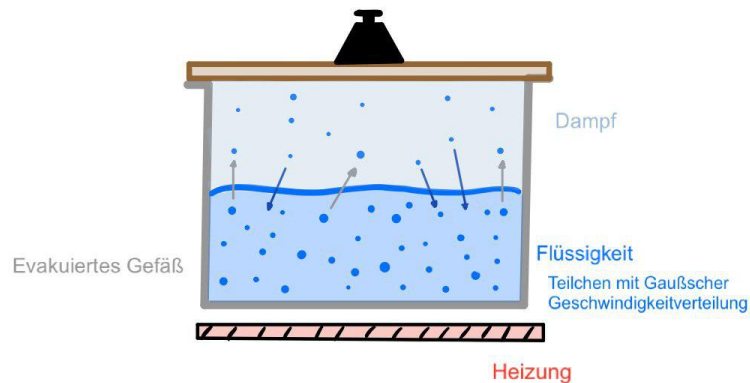


Abbildung 1: Druckkessel

Betrachtet wird der Phasenübergang von Wasser. Dabei haben generell die Phasen (fest, flüssig, gasförmig) zwei Freiheitsgrade - die Temperatur T und den Druck p . Dabei gibt es Bereiche in denen zwei Phasen nebeneinander vorliegen. Hierbei sind die Temperaturen T und der Druck p nicht frei wählbar. Es liegt nur noch ein Freiheitsgrad vor.

Diese Bereiche werden durch die Dampfdruck-Kurve beschrieben, die die Phasen von einander abgrenzt. Auf dieser Kurve gibt es zwei charakteristische Punkte:

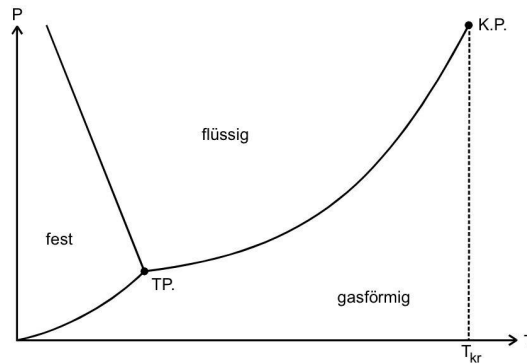


Abbildung 2: Zustandsdiagramm des Wassers [4, S. 176]

1. Tripelpunkt (T.P.): Beschreibt den Zustand in denen alle drei Aggregatzustände nebeneinander vorliegen.
2. Kritischer Punkt (K.P.): Ist das Ende der Dampfdruckkurve, und beschreibt den Zustand, in dem zwischen dem Aggregatzustand flüssig und gasförmig nicht mehr unterschieden werden kann.

Befindet man sich irgendwo anders auf der Kurve, so koexistieren zwei Phasen.

1.2 Verdampfungswärme L

Die Dampfdruckkurve wird bestimmt durch die Verdampfungswärme L . Diese Größe ist eine charakteristische Größe der Substanz und im allgemeinen temperaturabhängig. Allerdings verhält sie sich in Nähe des Tripelpunktes in guter Näherung konstant (temperaturunabhängig).

Definition molare Verdampfungswärme L :

Gibt die Energie an, die benötigt wird, um einen Mol einer Flüssigkeit in Dampf der gleichen Temperatur umzuwandeln.

1.3 Clausius-Clapeyronsche Gleichung

Liegt die Temperatur T weit unter dem kritischen Punkt (K.P.), so gelten folgende Näherungen:

1. Das Volumen der Flüssigkeit V_F ist gegenüber dem Volumen des Dampfes V_D vernachlässigbar
2. V_D lässt sich durch die Allgemeine Gasgleichung 1 beschreiben
3. L ist druck- und temperaturunabhängig

$$\frac{R}{p} dp = \frac{L}{T^2} dT \quad (2)$$

somit folgt:

$$(V_D - V_F) dp = \frac{L}{T} dT \quad (3)$$

Dabei können V_D und V_F komplizierte Funktionen der Temperatur T sein, wodurch eine Integration im allgemeinen schwierig ist.

Unter den angeführten Bedingungen folgt aber für die Integration:

$$\ln(p) = -\frac{L}{R} \frac{1}{T} + \text{const} \Leftrightarrow p = p_0 \exp\left(-\frac{L}{R} \cdot \frac{1}{T}\right) \quad (4)$$

2 Durchführung

2.1 Aufbau

Für den Druckbereich von $p \leq 1\text{bar}$ wird folgende Apperatur verwendet:

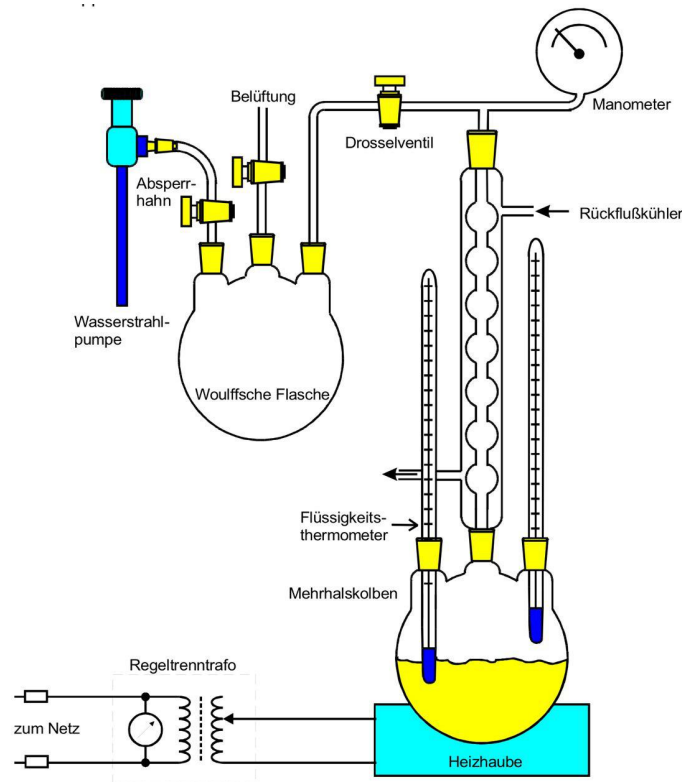


Abbildung 3: Apperatur 1 - niedrigdruck Bereich [4, S. 181]

Dabei wird zuerst die Apparatur mithilfe der Wasserstrahlpumpe auf den niedrigsten Druck evakuiert (hier $p_0 = 26\text{mbar}$). Mithilfe der Heizhaube wird das Wasser erhitzt. Damit der aufsteigende Wasserdampf nicht in das Manometer steigt, durchläuft den Rückflußkühler kaltes Wasser, sodass der aufsteigende Wasserdampf wieder kondensiert.

Über das Flüssigkeits- und das Dampfthermometer kann die Temperatur T gemessen werden. Zur Temperaturmessung wird hier das Dampfthermometer verwendet. Nun wird für jedes Grad der Temperatur T der passende Druck p gemessen. Während der Temperatursteigerung muss dabei der Rückflußkühler runter geregelt werden, bis es am Ende nur noch tröpfchenweise aus diesem läuft, weil dieser sonst zu stark kühlt und die Temperaturmessung verfälschen würde.

Die feinjustierung der Kühlung ist dabei von exentieller Wichtigkeit. Erreicht der Dampf eine Temperatur $T \approx 95^\circ\text{C}$ so beginnt das Kühlwasser zu sieden, Blasen zu bilden, die in der Spirale aufzusteigen. Dies führte zu einem Druck- und Temperaturabfall.

Für Drücke von $p \geq 1\text{bar}$ wird folgende Apperatur verwendet:

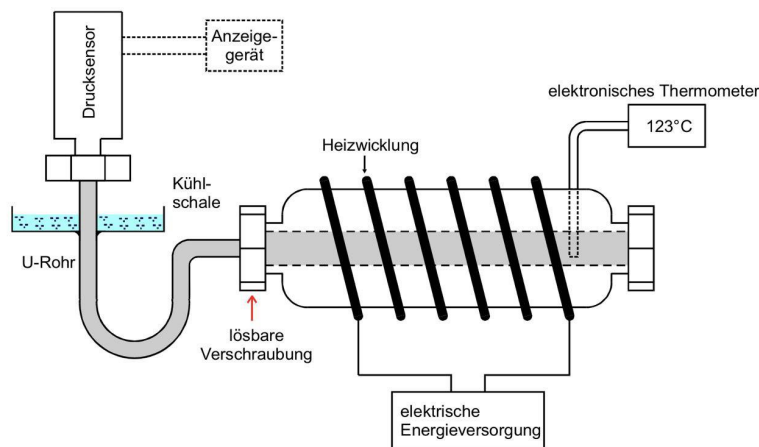


Abbildung 4: Apparatur 2 - Hochdruck Bereich [4, S. 183]

Dabei besteht der Heizkörper aus einem durchborten Stahlbolzen in dessen Hohlraum das Wasser ist. Dieser ist von einer Heizwicklung umgeben. Ein elektrisches Thermometer ermöglicht, die Themperatur im inneren des Bolzens zu messen. Auf dem Anzeigegerät kann nun der Sättigungsdruck abgelesen werden. Für jeden Anstieg des Drucks um 0,5 bar über Atmosphärendruck wird die Temperatur in $^\circ\text{C}$ abgelesen.

3 Auswertung

3.1 Niedrigdruckbereich

Damit werden aus der Ausgleichsgeraden die Parameter bestimmt:

$$f(x) = a \cdot x + b$$

$$a = -5148 \pm 15 \text{ K}$$

$$b = 11.52 \pm 0.05$$

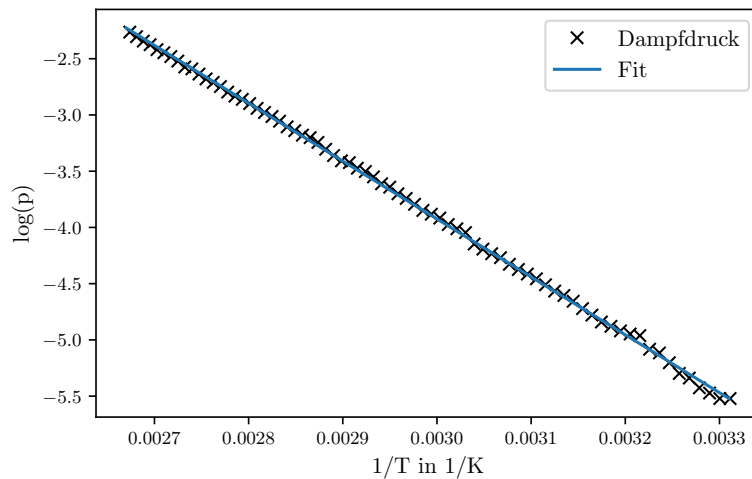


Abbildung 5: Ausgleichskurve für den Bereich unter 1 Bar

Nachdem (4) nach L umgestellt wird folgt für a :

$$\ln(p) = -\frac{L}{R} \frac{1}{T} + \text{const}$$

$$L = -a \cdot R$$

Daraus folgt:

$$L = (42.80 \pm 0,12) \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Aus dieser Verdampfungswärme L soll nun die äußere Verdampfungswärme L_a bestimmt werden. Dazu muss die Volumenarbeit $W = pV$ mit der idealen Gasgleichung gleichgesetzt werden. Für 100°C ergibt sich:

$$L_a = pV = RT = 3101,3 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Die dementsprechende innere Energie wird nun über die Differenz von L und L_a berechnet

$$L_i = L - L_a = (39,70 \pm 0,12) \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{mol}}$$

Um die genauere innere Energie jedes einzelnen Moleküls zu erhalten muss die gesamte innere Energie noch durch die Avogadro Konstante geteilt werden.

$$L_i = 0.4115 \pm 0.0012 \text{eV}$$

3.2 Hochdruckbereich

Aus (3) folgt für L :

$$L = T(V_D - V_F) \frac{dp}{dT}$$

In der Formel wird V_F vernachlässigt und V_D wird mit folgender Formel berechnet:

$$\left(p + \frac{a}{V_D^2}\right)V = RT \quad \text{mit } a = 0,9 \frac{\text{Joule m}^3}{\text{Mol}^2}$$

$$V = \frac{RT}{2p} \pm \sqrt{\frac{RT^2}{2p} - \frac{a}{p}}$$

Für den Bereich über 1 Bar ist L temperaturabhängig, daher wird hier p nicht logarithmisch über T geplottet. Als Fit wird hier ein Polynom 3. Ordnung verwendet.

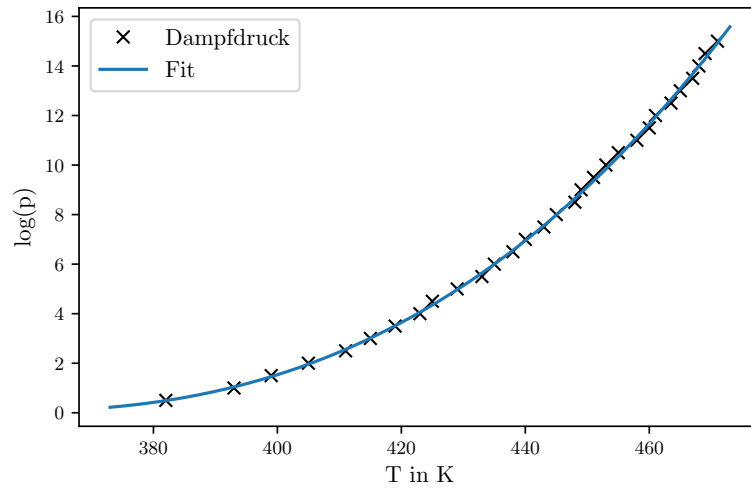


Abbildung 6: Ausgleichskurve für den Bereich über 1 Bar

Der Fit in Form von $p(T) = aT^3 + bT^2 + cT + d$ hat folgende Parameter:

$$a = (4,3 \pm 1,4) \cdot 10^{-6} \frac{\text{Pa}}{\text{K}^3}$$

$$b = -0,0040 \pm 0,0019 \frac{\text{Pa}}{\text{K}^2}$$

$$c = 1,2 \pm 0,8 \frac{\text{Pa}}{\text{K}}$$

$$d = -1,1 \pm 1,1 \text{ Pa}$$

Mit Formel (11) in Formel (9) eingesetzt und den passenden Messwerten ergibt sich für L in Abhängigkeit von der Temperatur

$$L(T) = \frac{(3aT^3 + 2bT^2 + cT)}{aT^3 + bT^2 + cT + d} \cdot \left(\frac{RT}{2} \pm \sqrt{\frac{RT^2}{2} - 0,9 \cdot (aT^3 + bT^2 + cT + d)} \right)$$

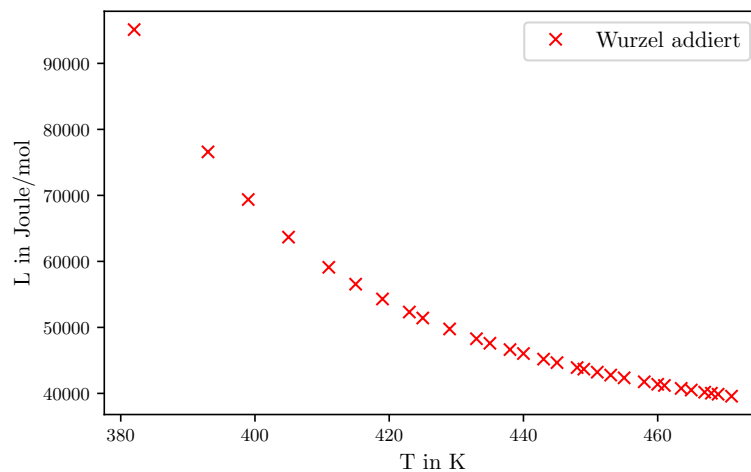


Abbildung 7: Verdampfungswärme nach Temperatur aufgetragen

4 Diskussion

Für die Messergebnisse im Niederdruckbereich wurden die ersten beiden Werte aus der Berechnung entfernt, da nach ihnen ein großer Temperatursprung stattfindet, der aus Problemen mit der Messapparatur stammt. Wenn der somit berechnete Wert aus der Messung im niedrigen Druckbereich mit dem Literaturwert verglichen wird liegt er mit dem Fehlerbereich genau auf dem Literaturwert.

Bei der Messung für den Verdampfungskoeffizient in Temperaturabhängigkeit muss aus physikalischen Gründen der Fall in dem die Wurzel addiert wird betrachtet werden. Dieser Fall wird als Kurve in Abb. 7 gegen die Temperatur aufgetragen und passt in die physikalische Voraussetzung, dass der Verdampfungskoeffizient zum kritischen Punkt hin kleiner werden muss und gegen Null fällt. Bei den Kurven fällt auf, dass unsere Plots sehr gut auf die Messdaten passen und daher die Parameter wahrscheinlich auch repräsentativ für die Messung sind.

Literatur

- [1] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [2] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [3] „Verdampfungswärme und Kondensationswärme“. In: (). URL: https://www.energielexikon.info/verdampfungswaerme_und_kondensationswaerme.html.
- [4] *Versuchsaneitung V203 - Verdampfungswärme und Dampfdruck-Kurve*. TU Dortmund, 2019.