



Physikalisches Praktikum I

Bachelor Physikalische Technik: Lasertechnik, Biomedizintechnik

Prof. Dr. H.-Ch. Mertins, MSc. M. Gilbert

TH03 Bestimmung der Dampfdruckkurve (Pr_PhI_TH03_Dampfdruck_6, 14.07.2014)

Name	Matr. Nr.	Gruppe	Team
1.			
2.			
Protokoll ist ok	O	Datum	Abtestat
Folgende Korrekturen nötig	O		
Teilnahme erfordert erfolgreiches Beantworten der Zulassungsfragen am Versuchstag (siehe Anleitung).			

1. Ziel

Thermodynamische Prozesse der Phasenübergänge spielen in der alltäglichen Physik und Chemie sowie bei industriellen Fertigungstechniken eine wichtige Rolle. Zudem ist der Einsatz von Vakuumtechnologie in vielen Produktionsbereichen unverzichtbar geworden. In diesem und einem weiteren Praktikum sollen Sie mit den entsprechenden Technologien vertraut gemacht werden.

2 Theorie

Die hier behandelte Thematik entspricht zum Teil dem, was Sie im Praktikum „Spezifische Wärme und Wirkungsgrad“ kennen gelernt haben. In diesem Praktikum wollen wir in einem weiteren Schritt die molekularen Grundlagen dieser thermodynamischen Phänomene betrachten.

2.1 Dampfdruck

Bringt man in ein evakuiertes, geschlossenes Gefäß eine Flüssigkeit, die es nur teilweise ausfüllt, so verdampft ein Teil in den Gasraum. Einige Moleküle des Gasraums kehren aber wieder zurück in die Flüssigkeit (Kondensation). Wenn gleich viele Moleküle aus der Flüssigkeit austreten wie zurückkommen, stellt sich ein Gleichgewicht ein. Der für jede Flüssigkeit charakteristische Gleichgewichtsdruck ist der Dampfdruck $p_D(T)$, der selbst von der Temperatur abhängt. Aus der Flüssigkeit treten nur die „heißen“ Moleküle aus, deren kinetische Energie E_{kin} größer als die charakteristische Austrittsarbeit W ist. Die Energie E_{kin} eines Moleküls hängt von seiner Temperatur T und seinem atomaren Aufbau, charakterisiert durch den Freiheitsgrad f ab:

$$(1) \quad E_{kin} = f/2 kT,$$

$$(2) \quad E_{kin} > W \Rightarrow \text{„heiße“ Moleküle verdampfen.}$$

Mit steigender Temperatur können mehr und mehr Moleküle die Austrittsarbeit aufbringen, d.h. verdampfen bis sich wieder ein Sättigungsdampfdruck einstellt. Die Wahrscheinlichkeit, ob sich ein Molekül in der Flüssigkeit oder im Dampf aufhält, wird durch die Boltzmannverteilung gegeben. Nur für (p, T) -Pa-

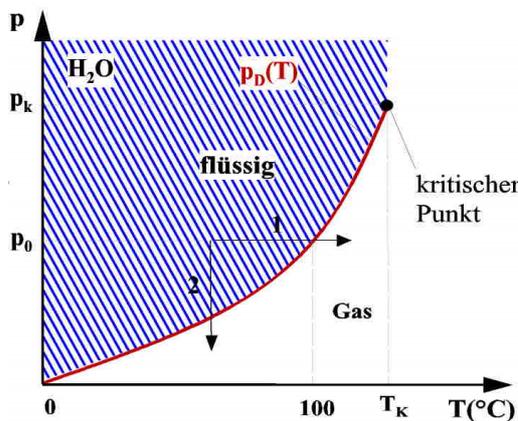


Abb. 1a

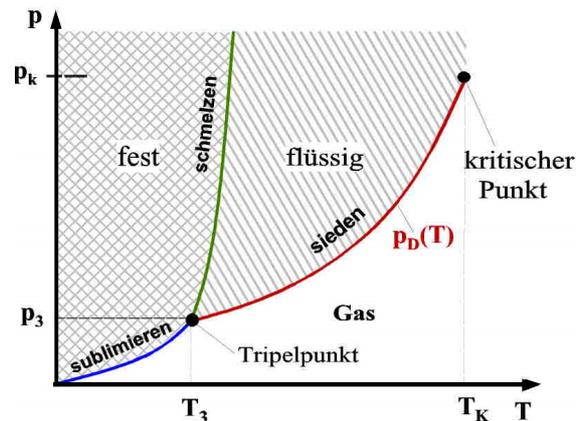


Abb. 1b

are die auf der Dampfdruckkurve $p_D(T)$, liegen stellt sich ein Gleichgewicht zwischen den Phasen Dampf & Flüssigkeit ein (siehe Abb. 1a für Wasser). Oberhalb der Dampfdruckkurve findet man die flüssige, unterhalb die gasförmige Phase. Für Temperaturen oberhalb der kritischen Temperatur T_{krit} existiert nur noch die gasförmige Phase. Die Grenze zwischen flüssigem und festem Zustand wird durch die Schmelz-

kurve erfasst (Abb. 1b). Die Grenze zwischen gasförmig und fest wird durch die Sublimationskurve beschrieben. Der Tripelpunkt ist genau ein Wertepaar (T_3, p_3) an dem sich alle drei Aggregatzustände im Gleichgewicht befinden. Die in unserem Praktikum zu bestimmende Dampfdruckkurve erfasst also nur einen Teilbereich des p-T-Zustandsdiagramms.

2.2 Sieden

Wenn der auf einer Flüssigkeit lastende Druck eines Gases so weit reduziert wird bis er gleich dem Dampfdruck der Flüssigkeit wird, so siedet diese (Übergang 2 in Abb. 1a). Das bedeutet, dass sich Dampf nicht nur an der Oberfläche, sondern auch in der Flüssigkeit in Form von Blasen entwickelt. Dies kann zu schweren Problemen führen, wenn bei einem zu schnell aufsteigenden Taucher Sauerstoff aus dem Blut ausperlt (kochendes Blut).

Da der Dampfdruck von der Temperatur abhängt, ändert sich auch die Siedetemperatur mit dem Gasdruck. Die Werte (p, T) auf der Dampfdruckkurve geben also den „Schaltunkt“ zum Sieden an. Dies werden wir im Praktikum untersuchen. Im Praktikum „Spezifische Wärme und Wirkungsgrad haben wir die Grenze zum Sieden überschritten, indem wir den Druck $p = 1$ bar konstant gehalten und die Wassertemperatur bis zur Siedetemperatur $T = 100^\circ\text{C}$ gesteigert haben (Übergang 1 in Abb. 1a).

2.3 Verdampfungsenergie

Die zum Verdampfen notwendige Energie E_{kin} entziehen die Moleküle der Flüssigkeit in Form von Wärme. Die Energie muss durch Heizen der Flüssigkeit nachgeführt werden, ansonsten fällt die Temperatur, denn die schnellen Moleküle verdampfen und nur die langsamen Moleküle mit kleiner kinetischer Energie (kleiner Temperatur) bleiben zurück (siehe Gl. 1). Dieses Prinzip kann zum Kühlen (Kühlschrank) ausgenutzt werden. In der Forschung, wo extrem tiefe Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt benötigt werden, wird das über dem flüssigen Helium ($T = 4,2$ K) befindliche Heliumgas „abgepumpt“ und somit Temperaturen unter 1 K erreicht.

Wenn die Temperatur der Flüssigkeit beim Verdampfen aber konstant bleiben soll, muss man die spezifische Verdampfungsenergie λ zuführen (Praktikum „Spezifische Wärme und Wirkungsgrad). Im umgekehrten Prozess, der Kondensation, wird diese wieder frei. Die Verdampfungsenergie pro Molekül ist $W = \lambda \cdot m$ ($m =$ Masse des Moleküls). Sie hängt empfindlich von den Kräften zwischen den einzelnen Molekülen ab. Die Kräfte selbst folgen aus der elektronischen und quantenmechanischen Wechselwirkung der Moleküle untereinander. Sind die Kräfte klein, dann lassen sich Moleküle mit wenig „Energieaufwand“ verdampfen, also trennen. Jede Substanz hat demnach ihre charakteristische Verdampfungsenergie. Entsprechend der Boltzmannverteilung lässt sich die Dampfdruckkurve p_D wie folgt darstellen:

$$(3) \quad p_D(T) = b k T \exp\{-W/kT\}$$

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K, Boltzmannkonstante}$$

b : nahezu konstant, enthält die Teilchenzahldichte der Flüssigkeit

Bei genauer Betrachtung zeigt sich, dass b und auch W von der Temperatur abhängen. In unserem Praktikum werden b und W aber in erster Näherung als konstant angenommen um später aus der Dampfdruckkurve die Verdampfungsenergie W zu bestimmen.

2.4 Technologie

Zur Vakuumherzeugung benutzen wir eine Drehschieberpumpe. Sie besteht aus einem zylindrischen Gehäuse (Abb.2), in dem sich ein exzentrisch gelagerter, geschlitzter Rotor dreht. Der Rotor besitzt durch Federn auseinander gedrückte Schieber, die an der Gehäusewand entlang gleiten und die an der Saugöffnung eingedrungene Luft vor sich herschieben. Diese wird am ölüberlagerten Auspuffventil ausgestoßen. Der Ölvorrat dient als Schmierung, gleichzeitig als Dichtung und zum Abführen der Kompressionswärme, also zur Kühlung. Mit zweistufigen Drehschieberpumpen sind Enddrücke von bis zu 10^{-3} mbar möglich. Die Saugleistung beträgt je nach Baugröße, $1 \text{ m}^3/\text{h}$ bis $600 \text{ m}^3/\text{h}$. Leider stört das Öl um ein sauberes Vakuum zu erhalten, da Ölmoleküle gegen die Saug-richtung strömen können.

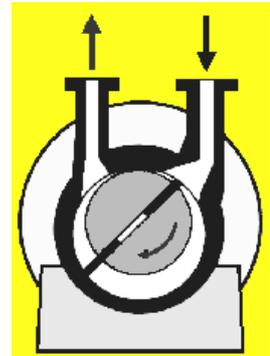


Abb.2

Das Federmanometer wird zur Druckmessung im Bereich von ca. 10 mbar bis 1013 mbar genutzt. Es basiert auf der durch die Druckdifferenz ausgeübte Kraft. Eine evakuierte Kapsel (blaues Rohr in Abb. 3) mit der effektiven Querschnittsfläche A erfährt bei einem Druckunterschied p zum Außenraum die Kraft $F = pA$. Durch einen Hebelmechanismus wird diese auf einen Zeiger mit kalibrierter Druckskala umgesetzt.

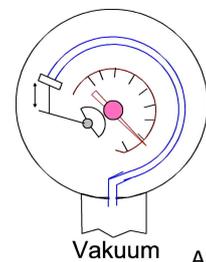


Abb.3

Fragen: Zulassung

- Wie ist die innere Energie eines Gases definiert?
- Wie ist der Dampfdruck definiert?
- Was ist Verdampfungswärme?
- Skizzieren Sie das p-T-Diagramm von Wasser incl. Tripelpunkt und kritischer Temperatur.
- Wie funktionieren Drehschieberpumpe und Federmanometer?

3. Durchführung

Vorbereitung

Machen Sie sich mit dem Experiment (Abb. 4) vertraut. Prüfen Sie die Vakuumverbindung (Rezipient, Ventil, Pumpe). Setzen Sie die Schutzhaube über den Rezipienten. Starten Sie die Pumpe und evakuieren Sie bis zum maximal erreichbaren Vakuum ($p < 10$ mbar, Manometer Zeigeranschlag). Stoppen Sie die Pumpe und schließen das Kugelhahnventil zur Pumpe. Stellen Sie mit dem Dosierventil diverse Drücke im Rezipienten ein und belüften Sie wieder.

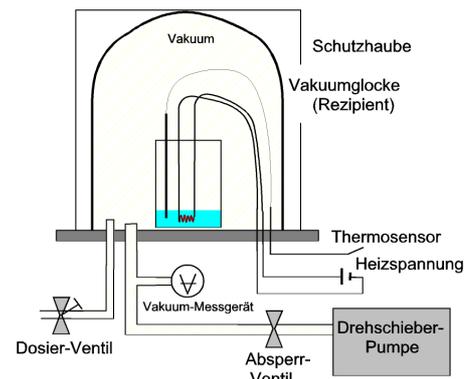


Abb. 4

Versuchen Sie nie bei evakuiertem Zustand oder mit Gewalt die Vakuumverbindungen zu lösen.

Sie füllen das Glas bis knapp über die Heizwendel mit Wasser, schließen den Temperatursensor und Heizung an und stellen das Glas sicher auf die thermische Isolation (Plexiglasplatte). Stellen Sie vorsichtig die Vakuumglocke über die Anordnung, sowie die Schutzhaube.

Messung Dampfdruck

3.1 Evakuieren Sie bei Zimmertemperatur bis der Siedevorgang deutlich einsetzt. Kugelhahn schließen. In den meisten Fällen bricht dann der Siedevorgang ab und Druck und Temperatur werden notiert. Falls es weiter siedet: Dosierventil öffnen und Druck ansteigen lassen, bis der Siedevorgang wieder abbricht. In diesem Moment muss dann das Wertepaar Temperatur und Druck notiert werden. Um einen Punkt auf der Dampfdruckkurve aufzunehmen wird die Kurve dann also zweimal „überquert“ und beim zweiten mal (= Abbruch des Siedevorgangs) das Werte-paar erfasst. Die Messgenauigkeiten sind: $\Delta T \approx 2^\circ\text{C}$, $\Delta p \approx 20$ mbar.

3.2 Nehmen Sie jetzt mindestens 8 weitere Punkte der Dampfdruckkurve von ca. 25°C bis ca. 85°C auf. Dies ist etwa der Druckbereich von 20 mbar bis 800 mbar. Messen Sie folgendermaßen:

- Heizung hoch regeln (max. 3 A) und warten bis die Temperatur um ca. 15°C steigt
- evakuieren Sie bis zum Sieden. Damit mischen Sie warme und kalte Wasserbereiche.
- Kugelhahn schließen, Dosierventil leicht öffnen und Druck ansteigen lassen.
- wenn der Siedevorgang abbricht, notieren Sie Druck & Temperatur incl. Fehler. Danach sofort wieder bis auf Normaldruck belüften, damit nicht zu viel Wasser verkocht!
- 8 Wertepaare p-T aufnehmen um die Dampfdruckkurve sicher bestimmen zu können.

Tripelpunkt

3.3 Hier entziehen Sie dem Wasser durch Evakuieren Verdampfungswärme: Glas ca. 5 - 10 mm mit kaltem Wasser ($\sim 20^\circ\text{C}$) füllen und auf die Isolierplatte stellen. Nur den Thermosensor, nicht die Heizwendel in das Glas stellen.

Evakuieren Sie und messen bei laufender Pumpe die Wassertemperatur als Funktion der Zeit in Schritten von 10 s, (später in größeren Abständen) über einen Zeitraum von 5 min. Wenn Sie das Wasserglas gut isoliert haben, können Sie den Tripelpunkt erreichen und sogar Eis herstellen. Notieren Sie den Zeitpunkt der Eisbildung.

4. Auswertung

4.1 Erstellen Sie die Dampfdruckkurve $p(T)$ aus den Daten von 3.2 für den Bereich $0^\circ < T < 100^\circ\text{C}$ incl. Fehlerabschätzung.

4.2 Tragen Sie mindestens 5 Literaturwerte im gesamten Bereich der Grafik aus 4.1 ein.

4.3 Bestimmen Sie die Verdampfungsenergie W von Wasser mittels der Gleichung:

$$p_D = \frac{N}{V} kT e^{-W/kT} \quad \text{Die Gleichung kann linearisiert werden wobei wir setzen } b \approx N/V .$$

Umformen und Logarithmieren bringt:

$$\ln\left(\frac{p_D}{T}\right) = \ln\left(\frac{N}{V} k\right) - \left(\frac{W}{k} \cdot \frac{1}{T}\right). \quad \text{Dies hat die Form } y = b - mx \quad \text{mit } x = 1/T.$$

Zur Auswertung tragen Sie also $\ln(p_D/T)$ über $1/T$ auf und bestimmen aus der Steigung W .

Geben Sie eine Fehlerabschätzung für ΔW aus dem Steigungsfehler an und vergleichen Sie Ihr Resultat mit Literaturwerten.

4.4 Tragen Sie die in 3.3 ermittelten Daten in ein $T(t)$ Diagramm ein (incl. Fehlerbalken) und diskutieren Sie den Verlauf. Tragen Sie den Tripelpunkt ein. Geben Sie die Literaturwerte für den Druck und Temperatur des Tripelpunktes von Wasser an.

Betriebsanweisung für Vakuumpumpstand 0,1 mbar



Der Pumpstand besteht im Wesentlichen aus einer Drehschieber-Vakuumpumpe, Ventilen und Absperrhähnen, sowie einer Vakuüm-Glasglocke mit Kunststoff Schutzhaube. Zusätzlich sind in der Vakuümglocke eine Heizwendel und ein Temperatursensor angebracht. Die Heizwendel wird mit einer externen Stromquelle (3A max.) betrieben.

- Betreiben Sie den Pumpstand nur so, wie in der Praktikumsanleitung beschrieben.
- Die Saugleistung der Pumpe reicht aus, um bei unsachgemäßem Umgang schwere Verletzungen zu verursachen.
- Bevor die Pumpe angeschaltet werden darf, ist sicherzustellen, dass alle angeschlossenen Vakuümkomponenten wie Flanschsteile, Ventile, Kugelhähne, Barometer und Stromdurchführungen spannungsfrei und nicht verkanntet montiert sind. Die Glasglocke muss plan auf der Gummidichtungsscheibe aufsitzen.
- **Über der Vakuümglocke muss vor der Evakuierung immer die Kunststoff-Schutzhaube angebracht werden.**
- Auch bei ausgeschalteter Pumpe herrscht in der Vakuüm-Glasglocke Unterdruck, solange sie nicht über das Lufteinlassventil belüftet wurde. → Implusionsgefahr! Berühren Sie die evakuierte Glasglocke weder mit Ihren Händen, noch mit irgendwelchen Gegenständen. Sollten Sie an der Kuppel Risse oder andere Schäden erkennen, melden Sie dies dem Betreuer.
- Vor jedem Wechsel einer Vakuümkomponente (s.o.) oder Entfernen der Schutzhaube und der Glasglocke muss das ganze Vakuümsystem vollständig über das Lufteinlassventil belüftet werden.
- Versuchen Sie niemals einen Vakuüm-Anschluss mit den Händen oder irgendwelchen Gegenständen zuzuhalten oder abzudichten. Solche Versuche enden mit schweren und schmerzhaften Quetschungen.
- Versuchen Sie nie, das evakuierte System mit Gewalt an irgendeiner Stelle zu öffnen. Eine „Kraftprobe“ an Vakuüm-Systemen ist gefährlich.
- Die Heizwendel muss in der Glasglocke stets so angebracht werden, dass sie ausschließlich mit der zu verdampfenden Probe oder dem Temperatursensor in Kontakt steht.
- Die Heizwendel wird bei den durchgeführten Experimenten im Vakuüm mit bis zu 3A betrieben. Geschieht dies unter Normaldruck verbrennt die Wendel nach kurzer Zeit!
Sollte dieser Fall bei Ihnen eintreten, schalten Sie Stromquelle ab und melden Sie den Vorfall sofort dem Betreuer.
- Die Heizwendel darf niemals ohne Beobachtung betrieben werden.