

Zur Theorie - die Dampfdruckkurve

Im Zweiphasengebiet liegt siedende Flüssigkeit zusammen mit ihrem gesättigten Dampf vor. Der Druck eines solchen Systems ist auf einer Isotherme konstant. Man kann also im Zweiphasengebiet jedem Druck eine Temperatur zuordnen, bei der die Flüssigkeit siedet. Dieser Druck heißt *Dampfdruck*, die zugehörige Temperatur wird *Siedetemperatur* genannt. Die Menge aller Wertepaare von Siedetemperatur und Dampfdruck ergeben eine Kurve in einem p,T -Diagramm. Diese Linie wird *Dampfdruckkurve* genannt. In der folgenden Abbildung ist der Verlauf einer Dampfdruckkurve dargestellt.

Dampfdruckkurve für Wasser
Temperaturbereich $T_{\text{Tripel}} - T_{\text{krit}}$

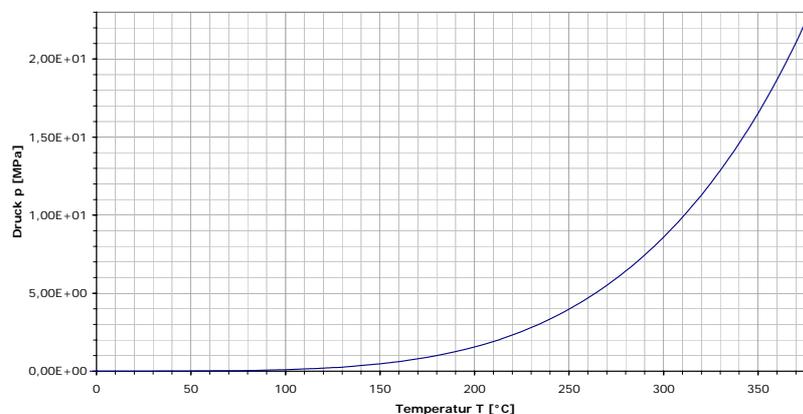


Abbildung 1: Dampfdruckkurve für Wasser

Im allgemeinen muß die Dampfdruckkurve für jeden Stoff experimentell bestimmt werden. Durch folgende Überlegungen kann die Anzahl der erforderlichen Messungen wesentlich verringert werden.

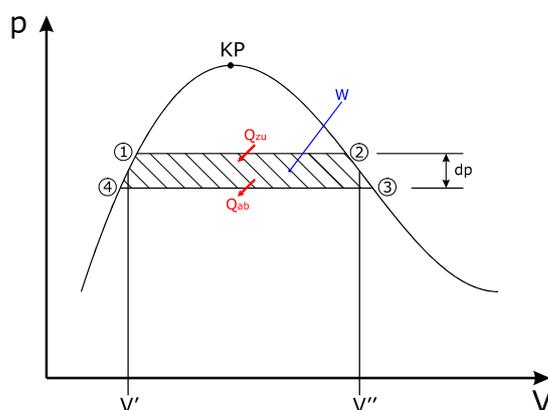


Abbildung 2: p,V -Diagramm für Wasser

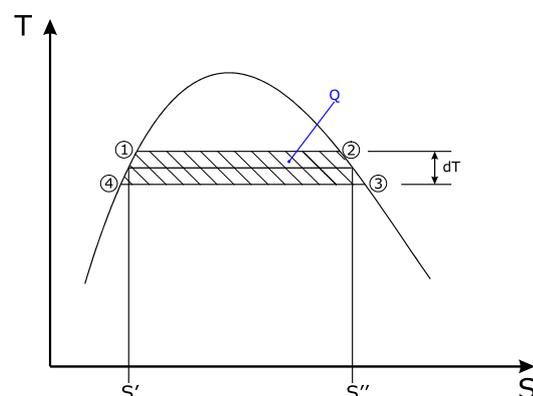


Abbildung 3: T,S -Diagramm für Wasser

Zustandsänderungen

1→2 : Verdampfung (Wärmezufuhr)

3→4 : Kondensation (Wärmeabfuhr)

2→3 : Expansion (Arbeit wird verrichtet)

4→1 : Verdichtung (Arbeit wird zugeführt)



Aus der Energie- und Entropiebilanz eines Kreisprozesses im Naßdampfgebiet mit differentieller Änderung von Druck und Temperatur ergibt sich

- graphisch $dw = - dp \cdot (v'' - v')$ (1)

- nach dem 2. Hauptsatz $dq = dT \cdot (s'' - s')$ (2)

Nach dem 1. Hauptsatz gilt $\oint du = 0 = dw + dq$ (3)

$\Leftrightarrow dq = - dw$ (4)

\Leftrightarrow mit (1), (2) $dT \cdot (s'' - s') = + dp \cdot (v'' - v')$ (5)

$\Leftrightarrow \frac{dp}{dT} = \frac{s'' - s'}{v'' - v'}$ (6)

Nebenrechnung: im Zweiphasengebiet mit $p = \text{const.}$ gilt nach dem 2. Hauptsatz:

$$dh = T \cdot ds + v \cdot dp \quad (i)$$

$\int_{s'}^{s''} \int_{p'}^{p''} v \cdot dp = 0$

$$\Rightarrow \Delta h_v = \int_{s'}^{s''} dh = \int_{s'}^{s''} T \cdot ds = T \cdot (s'' - s') \quad (ii)$$

$$\Leftrightarrow s'' - s' = \frac{\Delta h_v}{T} \quad (iii)$$

\Leftrightarrow (iii) in (6) eingesetzt $\frac{dp}{dT} = \frac{\Delta h_v}{T \cdot (v'' - v')} = \frac{r}{T \cdot (v'' - v')} \quad (7)$

Man erhält die differentielle Form der *Clausius-Clapeyronsche Gleichung*.

$$\boxed{\frac{dp}{dT} = \frac{r}{T \cdot (v'' - v')}} \quad (7a)$$

Mit folgenden Vereinfachungen

$$v' \ll v'' \quad (8)$$

$$p \cdot v'' = R \cdot T \quad (9)$$

ergibt sich folgende Gleichung:

\Leftrightarrow (8) angewendet auf (7a) $\frac{dp}{dT} = \frac{r}{T \cdot \left(v'' - \underbrace{v'}_{\text{klein gegen } v''} \right)} = \frac{r}{T \cdot v''} \quad (10)$



⇔ (9) angewendet auf (10)
$$\frac{dp}{dT} = \frac{r \cdot p}{T \cdot \langle R \cdot T \rangle} \quad (11)$$

⇔
$$\frac{dp}{dT} = \frac{r \cdot p}{R \cdot T^2} \quad (11a)$$

⇔
$$\frac{dp}{p} = \frac{r}{R} \cdot \frac{dT}{T^2} \quad (12)$$

⇔ integriert mit $r = \text{const.}$
$$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{r}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \quad (13)$$

⇔
$$\frac{p}{p_0} = e^{\frac{r}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \quad (14)$$

Das Ergebnis in Gleichung (14) ist die integrale Form der *Clausius-Clapeyronsche Gleichung*.

$$\frac{p}{p_0} = e^{\frac{r}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)}$$

Betrachtet man die Dampfdruckkurve in Abbildung 1, so ist deutlich der Verlauf nach der angegebenen Exponentialfunktion zu erkennen.

Literatur

- Arnold Frohn: Einführung in die technische Thermodynamik, Verlag Wittwer, 3. Auflage 1998
 - Fran Bosnjakovic: Technische Thermodynamik, Teil II, Damstadt, 8. Auflage, korr. Auflage 1998
 - Prof. Dr.-Ing. W. Nieratschker: Script zur Vorlesung Thermodynamik an der FH Koblenz, SS 2007
 - Erich Hahne: Technische Thermodynamik. Einführung und Anwendung ... Verlag: Oldenbourg, 4. Auflage, überarb. Auflage November 2004
-

Die Versuchsdurchführung

Ihre Aufgabe im Versuch 1 *Dampfdruckkurve* ist es, mit zwei verschiedenen Versuchsaufbauten die Dampfdruckkurve für Wasser in bestimmten Temperatur- und Druckbereichen aufzunehmen.

Sicherheitshinweise Die Oberfläche der Kochplatte, des Dampfkochtopfes sowie des Hochdruck-Dampfgerätes sowie alle Anzeigeninstrumente sind sehr heiß – es besteht Verbrennungsgefahr !



Benutzen Sie die bereitgelegten Hitzeschutzhandschuhe.

Beim Erreichen des Ansprechdruckes bläst das Sicherheitsventil des Dampfkochtopfes heißen Wasserdampf ab – es besteht Verbrennungsgefahr. Arbeiten Sie sowohl beim Dampfkochtopf wie auch beim Hochdruck-Dampfgerät nur hinter der bereitgestellten Schutzwand.

Versuch 1a: Schnellkochtopf



Versuch 1a: Schnellkochtopf

In den Schnellkochtopf werden 3,1 Liter destilliertes Wasser eingefüllt, so dass der Fühler des Thermometers ins Wasser eintaucht (es wird hier destilliertes Wasser verwendet, um Kalkablagerungen an den Instrumenten und Ventilen zu vermeiden). Jetzt wird der Schnellkochtopf verschlossen, das Sicherheitsventil (der runde schwarze Knopf auf der Deckelmitte) im Uhrzeigersinn auf Stellung II gedreht und die Kochplatte in Stufe 3 eingeschaltet. Ab einer Temperatur von 98°C sind Temperatur und Druck im Schnellkochtopf zu protokollieren; beim Aufheizvorgang empfiehlt sich eine Schrittweite von 2°C für die zu protokollierenden Meßwerte.

Erhöhen Sie die Temperatur bis zum automatischen Öffnen des Sicherheitsventils des Kochtopfes und protokollieren Sie Temperatur und Druck.

Das Sicherheitsventil bläst bei etwa 1,4 bar ab. Verringern Sie jetzt die Heizleistung der Kochplatte, schalten diese auf Stufe 2 und heizen Sie den Schnellkochtopf wieder auf. Beim Erreichen eines Druckes von 1,3 bar schalten Sie die Kochplatte ab und entfernen den Schnellkochtopf von der Platte. Stellen Sie den Schnellkochtopf auf der (silberfarbenen) hitzefesten Unterlage ab und protokollieren Sie jetzt Temperatur und Druck beim Abkühlen bis $T=98^{\circ}\text{C}$. Hier empfiehlt sich die kleinere Schrittweite von 1°C . Jetzt können Sie den Schnellkochtopf auf der hitzefesten Unterlage bis auf Raumtemperatur abkühlen lassen.

Benutzen Sie zur Meßwerterfassung den Protokollvordruck auf Seite 6 - zur Auswertung das Diagramm 1 von Seite 7.

Tragen Sie in grüner Farbe die Werte für Temperatur und Druck in Aufheizrichtung (also bei steigender Temperatur) und in roter Farbe die Werte für die Temperatur und Druck in Abkühlrichtung ein.

Hinweis: Sie messen hier einen Überdruck, d.h. einen Druck über dem Luftdruck. In einem p,T -Diagramm werden absolute Drücke dargestellt. Sie müssen also zu den Meßwerten noch den (aktuellen) Luftdruck hinzuaddieren.

Benutzen Sie zur Messung des Luftdruckes das Präzisionsbarometer; halten Sie auch diesen Wert im Meßprotokoll fest.

Achten Sie auf die Druckeinheiten: Ihre Meßwerte nehmen Sie in bar auf, den Luftdruck messen Sie in hektoPascal, die im Diagramm aufgetragene Einheit ist die SI-Einheit für den Druck, (Mega-)Pascal.

Zu welchem Ergebnis kommen Sie ?

Stellen Sie das Ergebnis stichwortartig dar.

Nennen Sie stichwortartig Gründe für mögliche Abweichungen.

Gibt es Unterschiede zwischen der Kurve für den Aufheiz- und Abkühlvorgang ? Wenn ja, woran liegt das ?

Dauer der Versuchsdurchführung: ca. 90 Minuten

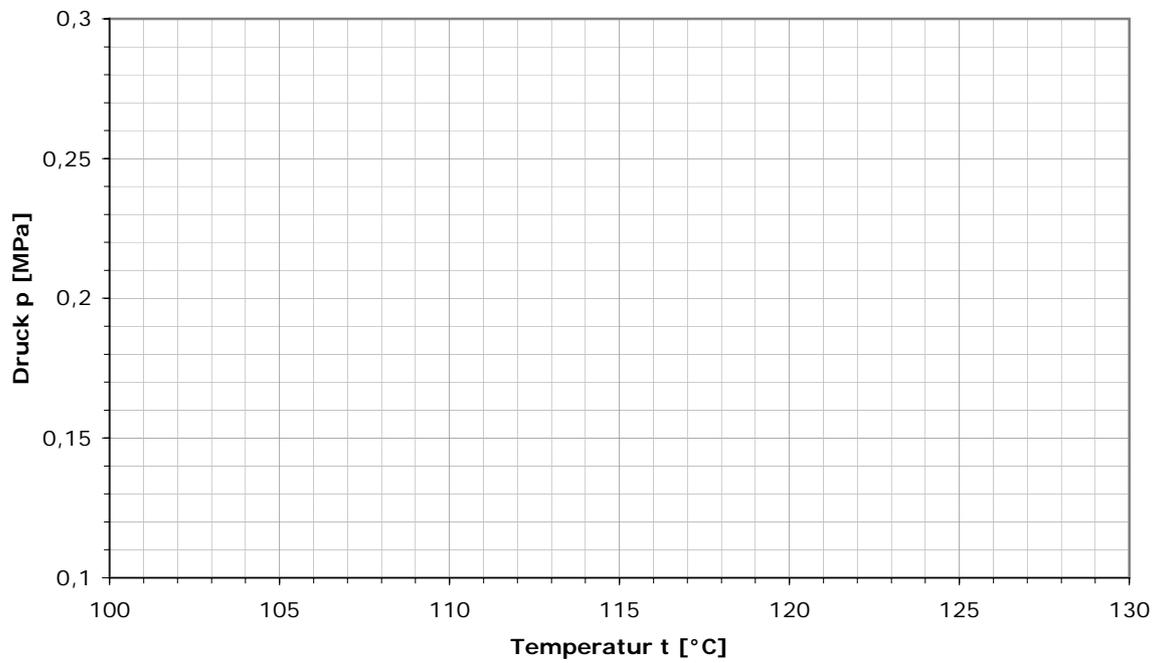
Versuch 1a: Protokollvordruck

Datum:	Uhrzeit:
$T_{\text{Raum, Versuchsbeginn}} =$ °C	$T_{\text{Raum, Versuchsende}} =$ °C
$p_{\text{Luft, Versuchsbeginn}} =$ hPa	$p_{\text{Luft, Versuchsende}} =$ hPa

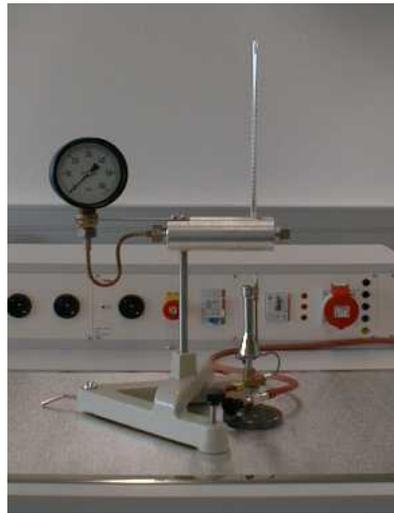
T [°C]	Aufheizvorgang (▶ grüne Kurve)			Abkühlvorgang (▶ rote Kurve)		
	p_{Mess} [bar]	p_{Mess} [MPa]	p_{Abs} [MPa]	p_{Mess} [bar]	p_{Mess} [MPa]	p_{Abs} [MPa]
98						
100						
101						
102						
103						
104						
105						
106						
107						
108						
109						
110						
111						
112						
113						
114						
115						
116						
117						
118						
119						
120						
121						
122						
123						
124						
125						

Diagramm 1: Auszug aus der Dampfdruckkurve

Temperaturbereich 100°C ... 130°C - Medium Wasser



Versuch 1b: Hochdruck-Dampfgerät



Versuch 1b: Hochdruck-Dampfgerät

Das Hochdruck-Dampfgerät ist mit destilliertem Wasser blasenfrei befüllt. Das Thermometer ist mit einer Wärmeleitpaste in einer Bohrung im Metallkorpus des Druckbehälters wärmeleitend verbunden. Die Wärmeleitung wird als Ideal angenommen. Der Druckbehälter wird mit einem Bunsenbrenner erhitzt. Ab einer Temperatur von ca. 95°C ist die Temperatur und der Druck im Druckbehälter zu protokollieren; es empfiehlt sich eine Schrittweite von 5°C. Erhöhen Sie die Temperatur bis zu einem Wert von 250°C.

Stellen Sie dann den Bunsenbrenner ab und protokollieren Sie auch in Abkühlrichtung Druck und Temperatur bis zum Erreichen einer Temperatur von 90°C – auch hier in Schritten zu 5°C.

Benutzen Sie zur Meßwerterfassung den Protokollvordruck auf Seite 10 und zur Auswertung das Diagramm 2 von Seite 11. Tragen Sie jetzt die protokollierten Werte in das beigefügte Diagramm 2 in Form von zwei Kurven ein.

Tragen Sie in grüner Farbe die Werte für Temperatur und Druck in Aufheizrichtung (also bei steigender Temperatur) und in roter Farbe die Werte für die Temperatur und Druck in Abkühlrichtung ein.

Hinweis: Sie messen hier einen Überdruck, d.h. einen Druck über dem Luftdruck. In einem p,T-Diagramm werden absolute Drücke dargestellt. Sie müssen zu den Meßwerten noch den (aktuellen) Luftdruck hinzuaddieren müssen.

Benutzen Sie zur Messung des Luftdruckes das Präzisionsbarometer; halten Sie auch diesen Wert im Meßprotokoll fest.

Achten Sie auf die Druckeinheiten: ihre Meßwerte nehmen Sie in bar auf, den Luftdruck messen Sie in hektoPascal, die im Diagramm aufgetragene Einheit ist die SI-Einheit für den Druck, (Mega-)Pascal.



Zu welchem Ergebnis kommen Sie ?

Stellen Sie das Ergebnis stichwortartig dar.

Nennen Sie stichwortartig Gründe für mögliche Abweichungen.

Gibt es Unterschiede zwischen der Kurve für den Aufheiz- und Abkühlvorgang ? Wenn ja, woran liegt das ?

Dauer der Versuchsdurchführung: ca. 90 Minuten

**Weiterführende
Informationen
zum Versuch 1a, 1b**

- Leybold Katalog S.122
 - Gebrauchsanweisung Leybold 388 61 (Schnellkochtopf)
 - Gebrauchsanleitung Fissler Vitavit
 - Gebrauchsanweisung Leybold 385 16 (Hochdruck-Dampfgerät)
-

Versuch 1b: Protokollvordruck

Datum: _____		Uhrzeit: _____	
$T_{\text{Raum, Versuchsbeginn}} =$ _____ °C		$T_{\text{Raum, Versuchsende}} =$ _____ °C	
$p_{\text{Luft, Versuchsbeginn}} =$ _____ hPa		$p_{\text{Luft, Versuchsende}} =$ _____ hPa	

T [°C]	Aufheizvorgang (▶ grüne Kurve)			Abkühlvorgang (▶ rote Kurve)		
	p_{Mess} [bar]	p_{Mess} [MPa]	p_{Abs} [MPa]	p_{Mess} [bar]	p_{Mess} [MPa]	p_{Abs} [MPa]
100						
110						
115						
120						
125						
130						
135						
140						
145						
150						
155						
160						
165						
170						
175						
180						
185						
190						
195						
200						
205						
210						
215						
220						
225						
230						
235						
240						
245						
250						



Diagramm 2: Auszug aus der Dampfdruckkurve

Temperaturbereich 100°C ... 280°C - Medium Wasser

