

Skript zum Versuch

F60

Hochdruckphasendiagramm

April 2018

Herausgeber: Institut für Physikalische Chemie

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabe	2
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Gleichgewichtsbedingungen	2
2.2 Stabilitätsbedingungen	2
2.3 Bedingungen für den kritischen Punkt	5
3 Durchführung des Versuchs	6
3.1 Ansetzen der kritischen Mischung	6
3.2 Beschreibung der Apparatur (dargestellt in Abb. 3)	6
3.3 Durchführung der Messung	8
3.3.1 Füllen des Druckerzeugungsteils mit Hydrauliköl:	8
3.3.2 Füllen der Messzelle:	8
3.3.3 Aufzeichnen der kritischen Kurven in der p - T -Ebene bei konstanter Konzentration x_c	9
3.3.4 Abschluss der Messungen:	10
4 Darstellung der Messergebnisse und Auswertung	10
5 Anhang	11
5.1 Literatur	11
5.2 Thermoelementtabelle	12
5.3 Was man wissen sollte	12
5.4 Hinweise für die Gefährdungsbeurteilung	12

1 Aufgabe

Man bestimme im p - T -Zustandsraum bei konstanter Konzentration $x = x_c$ (kritische Konzentration) das Phasendiagramm von Wasser – 2-Butoxyethanol.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Gleichgewichtsbedingungen

Bewegt sich ein geschlossenes System spontan auf seinen Gleichgewichtszustand zu, so führt dies zu einer Abnahme der molaren Freien Enthalpie: $dG_m \leq 0$. Im Gleichgewicht erreicht G_m ein Minimum, so dass gilt:

$$dG_m = 0, \quad p = \text{konst.}, \quad T = \text{konst.}, \quad n_J = \text{konst.}, \quad (1)$$

mit n_J Stoffmenge der Komponente J .

Besteht das gedachte System aus zwei Phasen α und β , dann gelten folgende Gleichgewichtsbedingungen:¹

$$\begin{aligned} T_\alpha &= T_\beta && \text{(thermische Gleichgewichtsbedingung)} \\ p_\alpha &= p_\beta && \text{(mechanische Gleichgewichtsbedingung)} \end{aligned} \quad (2)$$

Diese Feststellung ist keineswegs trivial; sie kann vielmehr, ausgehend vom 2. Hauptsatz der Thermodynamik, bewiesen werden (siehe z. B. HAASE 1956, S. 105 ff, insbesondere S. 110 f). Von besonderer Bedeutung in der Mischphasenthermodynamik ist das Stoffgleichgewicht. Die chemischen Potentiale der Komponenten müssen in beiden Phasen gleich sein. Die chemische Gleichgewichtsbedingung lautet deshalb:

$$\mu_{J,\alpha} = \mu_{J,\beta}$$

In einem Zweiphasen-Zweikomponentensystem muss also gelten:

$$\mu_{1,\alpha} = \mu_{1,\beta} \quad \text{und} \quad \mu_{2,\alpha} = \mu_{2,\beta} \quad (3)$$

2.2 Stabilitätsbedingungen

Die Gleichgewichtsbedingungen erlauben keine Aussage darüber, ob eine Phase prinzipiell existieren kann oder ob sie instabil ist gegenüber dem Zerfall in zwei Phasen. Nicht im Gleichgewicht befindliche Phasen (metastabile Zustände) sind allgemein bekannt. Sie treten immer dann auf, wenn der Weg zum Gleichgewicht kinetisch gehemmt ist. Beispiele dafür sind Glas, unterkühlte Flüssigkeiten, übersättigte Lösungen, übersättigte Dämpfe (Wilsonsche Nebelkammer).

Ob eine Phase bezüglich der Variablen x_1 (Molenbruch der Komponente 1) stabil ist, oder ob sie in zwei Phasen $x_{1,\alpha}$ und $x_{1,\beta}$ zerfällt, lässt sich am leichtesten graphisch plausibel machen. Siehe dazu Abb. 1.

¹bei Abwesenheit einer semipermeablen Membran (osmotischer Druck) sowie bei Abwesenheit gekrümmter Phasengrenzflächen (Laplace-Druck aufgrund der Grenzflächenspannung)

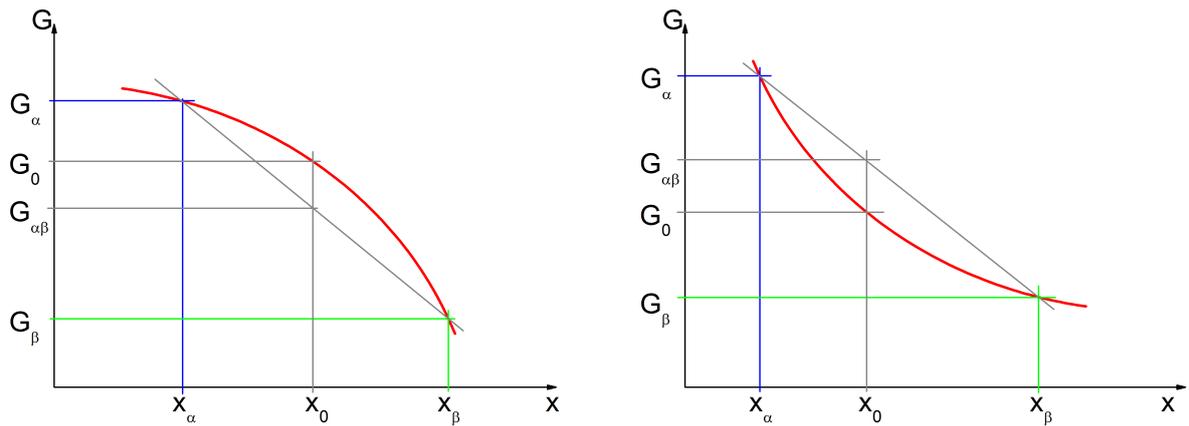


Abbildung 1: **Links:** Möglicher Verlauf von G als Funktion der Konzentration mit negativer Krümmung. **Rechts:** Verlauf mit positiver Krümmung

Gegeben sei eine hypothetische homogene Mischung der Konzentration x_0 mit der Freien Enthalpie G_0 . Die linke Seite der Abb. 1 zeigt einen funktionalen Zusammenhang $G(x)$ mit negativer Krümmung. Wenn diese Mischphase in zwei Phasen α und β mit den Freien Enthalpien G_α und G_β aufspaltet, so ist deren mittlere Freie Enthalpie $G_{\alpha\beta}$ offensichtlich kleiner als die der hypothetischen homogenen Phase mit der Freien Enthalpie G_0 . Die homogene Phase ist in diesem Fall instabil und es bilden sich zwei koexistierende Phasen. Die rechte Seite der Abbildung zeigt den umgekehrten Fall: Ein Zerfall der homogenen Phase in zwei Phasen wäre mit einem Anstieg der Freien Enthalpie verbunden ($G_{\alpha\beta} > G_0$). Die homogene Phase ist also stabil gegenüber dem Zerfall in zwei Phasen. Offenbar ist die Stabilitätsbedingung:

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} > 0 \quad (4)$$

Ein indifferenten Fall liegt an den Wendepunkten vor: $\partial^2 G / \partial x^2 = 0$. Diesen bezeichnet man als die Stabilitätsgrenze oder *Spinodale*.

Das typische Aussehen der Freien Enthalpie für ein entmischendes System (mit einem oberen kritischen Punkt) als Funktion von x bei konstantem Druck p zeigt Abb. 2. Die Gleichgewichtskonzentrationen der beiden Phasen α und β lassen sich durch Anlegen einer Doppeltangente ermitteln: Die Berührungspunkte mit der $G(x)$ -Kurve ergeben die Gleichgewichtsmolenbrüche x_α und x_β . Die Wendepunkte konstruieren die Stabilitätsgrenze.

Wenn sich das Zweiphasensystem im Gleichgewicht befindet gilt (man beachte die Schließungsbedingung $x_1 + x_2 = 1$):

$$G = x_1 \mu_1(x_1) + x_2 \mu_2(x_2). \quad (5)$$

Daraus kann man herleiten:

$$\frac{\partial G}{\partial x_1} = \mu_1 - \mu_2. \quad (6)$$

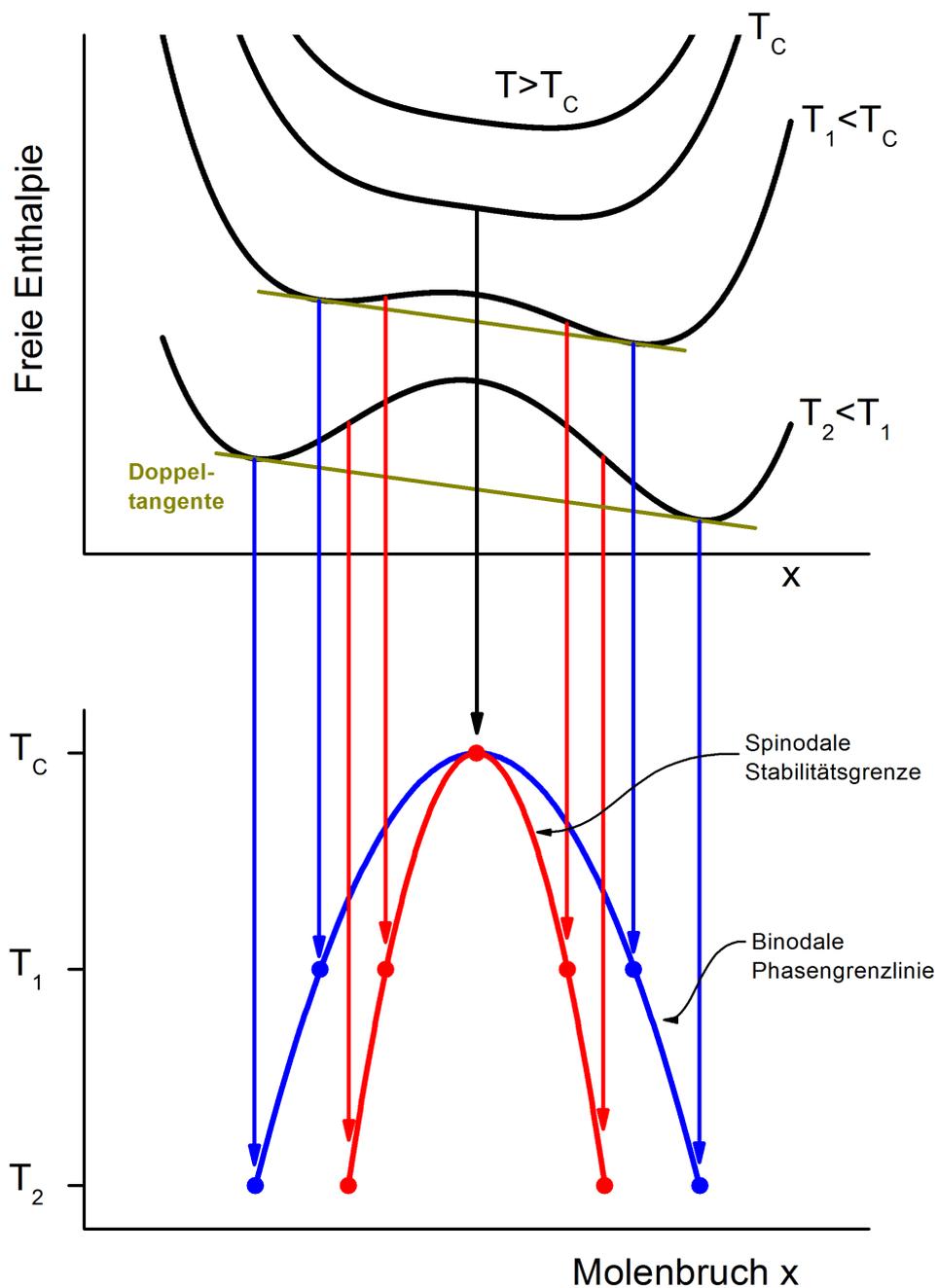


Abbildung 2: Typischer Verlauf der Freien Enthalpie als Funktion der Konzentration im Zweiphasengebiet bei den Temperaturen T_1 und T_2 , am kritischen Punkt T_c und oberhalb des kritischen Punkts. Das untere Diagramm zeigt, wie mit Hilfe der Doppeltangente das Phasendiagramm (Phasengrenzkurve = *Binodale*) und aus den Wendepunkten die Stabilitätsgrenze (*Spinodale*) konstruiert werden können.

Kombiniert man die Gleichungen 5 und 6 in geeigneter Weise, so ergeben sich:

$$\begin{aligned} G(x_1) &= \mu_1 - \left(\frac{\partial G}{\partial x_1} \right)_{T,p} x_2 \quad \text{und} \\ G(x_1) &= \mu_2 + \left(\frac{\partial G}{\partial x_1} \right)_{T,p} x_1 \end{aligned} \quad (7)$$

Beides sind lineare Gleichungen, also vom Typ $y = a + m \cdot x$, und mögliche Tangenten an die Funktion $G(x_1)$. Nur für die eingezeichnete Doppeltangente gilt außerdem die Gleichgewichtsbedingung (3).

2.3 Bedingungen für den kritischen Punkt

Bewegt sich das System durch Aufheizen auf einen oberen kritischen Punkt zu, nähern sich die beiden Zweige der Gleichgewichtskurve und der Stabilitätsgrenzkurve einander an. Wird $T = T_c$ so fallen die beiden Wendepunkte und die Gleichgewichtspunkte zusammen. Da für $T < T_c$ für den linken Wendepunkt $(\partial^3 G / \partial x^3)_{T,p} < 0$ und für den rechten $(\partial^3 G / \partial x^3)_{T,p} > 0$ gilt, so folgen plausibel die Bedingungen für einen kritischen Punkt:

$$\left(\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} \right)_{T_c,p} = 0 \quad \text{und} \quad \left(\frac{\partial^3 G}{\partial x^3} \right)_{T_c,p} = 0 \quad (8)$$

In binären Systemen können sowohl **obere** als auch **untere** kritische Punkte auftreten. Wie das Phasendiagramm eines binären Systems aussieht, kann man *a priori* nicht vorhersagen, sondern es muss durch Experimente bestimmt werden.

Die vorangegangenen Betrachtungen wurden unter der Voraussetzung variabler Konzentration, variabler Temperatur aber bei konstantem Druck durchgeführt. Erweitert man das Phasendiagramm um die Variable Druck, so entstehen aus der Aneinanderreihung von oberen bzw. unteren kritischen Punkten obere bzw. untere kritische Kurven. Diese kritischen Kurven können mit dem Druck sowohl fallen als auch steigen, was zu sehr vielen verschiedenen Typen von Phasendiagrammen führt (siehe dazu die Abb. 1 bei SCHNEIDER 1972).² Es hat sich in vielen Fällen gezeigt, dass die kritische Konzentration vom Druck nahezu unabhängig ist. Verwendet man eine binäre Mischung mit kritischer Konzentration x_c , so kann man bei Variation von T und p durch visuelle Beobachtung des Phasengeschehens das Zustandsdiagramm in der T - p -Ebene bestimmen.

Die Druckabhängigkeit der kritischen Temperatur ist verknüpft mit den thermodynamischen Mischungsgrößen. Es gilt exakt (siehe z. B. HAASE 1956, S. 412f):³

$$\frac{dT_c}{dp} = \frac{\left(\frac{\partial^2 V^E}{\partial x^2} \right)_c}{\left(\frac{\partial^2 H^E}{\partial x^2} \right)_c} T_c = \frac{\left(\frac{\partial^2 \Delta_{mix} V}{\partial x^2} \right)_c}{\left(\frac{\partial^2 \Delta_{mix} H}{\partial x^2} \right)_c} T_c \quad (9)$$

²Die Literatur liegt am Versuch aus.

³Nur bei den Zustandsgrößen V und H sind die Exzessgrößen identisch mit den Mischungsgrößen.

Der Index „c“ verweist darauf, dass die Größen am kritischen Punkt zu nehmen sind. Die Gleichung (9) bedeutet anschaulich: Kennt man die *Konzentrationsabhängigkeit* des Mischungsvolumens und der Mischungswärme in der Nähe des kritischen Punkts, können Aussagen über die Druckabhängigkeit der Mischungslücke gewonnen werden, **ohne ein Experiment im Autoklav durchführen zu müssen**.

3 Durchführung des Versuchs

3.1 Ansetzen der kritischen Mischung

In der Regel finden Sie eine ausreichende Menge der Mischung aus 2-Butoxyethanol ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$; CAS-Nr.: 111-76-2) und Wasser am Hochdruckstand vor.

3.2 Beschreibung der Apparatur (dargestellt in Abb. 3)

Vorbemerkungen:

Es handelt sich um eine Hochdruckapparatur, die mit Umsicht zu bedienen ist. Vergewissern Sie sich erst über die Folgen, bevor Sie ein Ventil betätigen. Die Ventile sind symbolisch dargestellt. Das Druckmedium (Hydrauliköl bzw. Mess-Substanz) kann entlang der schwarzen Linien gefördert werden. Die Ventile werden durch Verdrehen des Knebels im Uhrzeigersinn verschlossen. Der Verschluss im Ventil erfolgt an der mit einem roten Balken gekennzeichneten Stelle. Das Ventil X dient zu Wartungszwecken und bleibt während des gesamten Versuchs geschlossen.

Die Apparatur besteht aus folgenden Teilen:

1. Druckerzeugungsteil mit Druckmessung bis Ventil 3, bestehend aus Spindelpresse, Grobmanometer, zwei je nach Druckbereich zuschaltbaren Feinmanometern, den Hochdruckventilen 3, 4, 5, 6 und X, sowie dem Vorrat an Hydrauliköl.
2. Druckübertragungs- und Einfüllteil, bestehend aus den Hochdruckventilen 1 und 2, dem Vorratsbehälter für die Mess-Substanz, einem U-Rohr als Trennvolumen zwischen Hydrauliköl und Mess-Substanz, Evakuierungssystem mit Drehschieberpumpe, Kühlfalle und Woulfescher Flasche.
3. Messzelle mit Lampe und Beobachtungsspiegel. Die Messzelle ist als thermostatisierbarer Hochdruckautoklav ausgeführt. Die Phasentrennung wird im Durchlicht durch stirnseitig angebrachte Saphir-Hochdruckfenster beobachtet. Achtung: Niemals direkt durch die Fenster schauen, sondern immer indirekt über den Beobachtungsspiegel. Wenn der Autoklav unter Druck steht, niemals im Bereich der Autoklavenachse aufhalten.
4. Ölthermostat

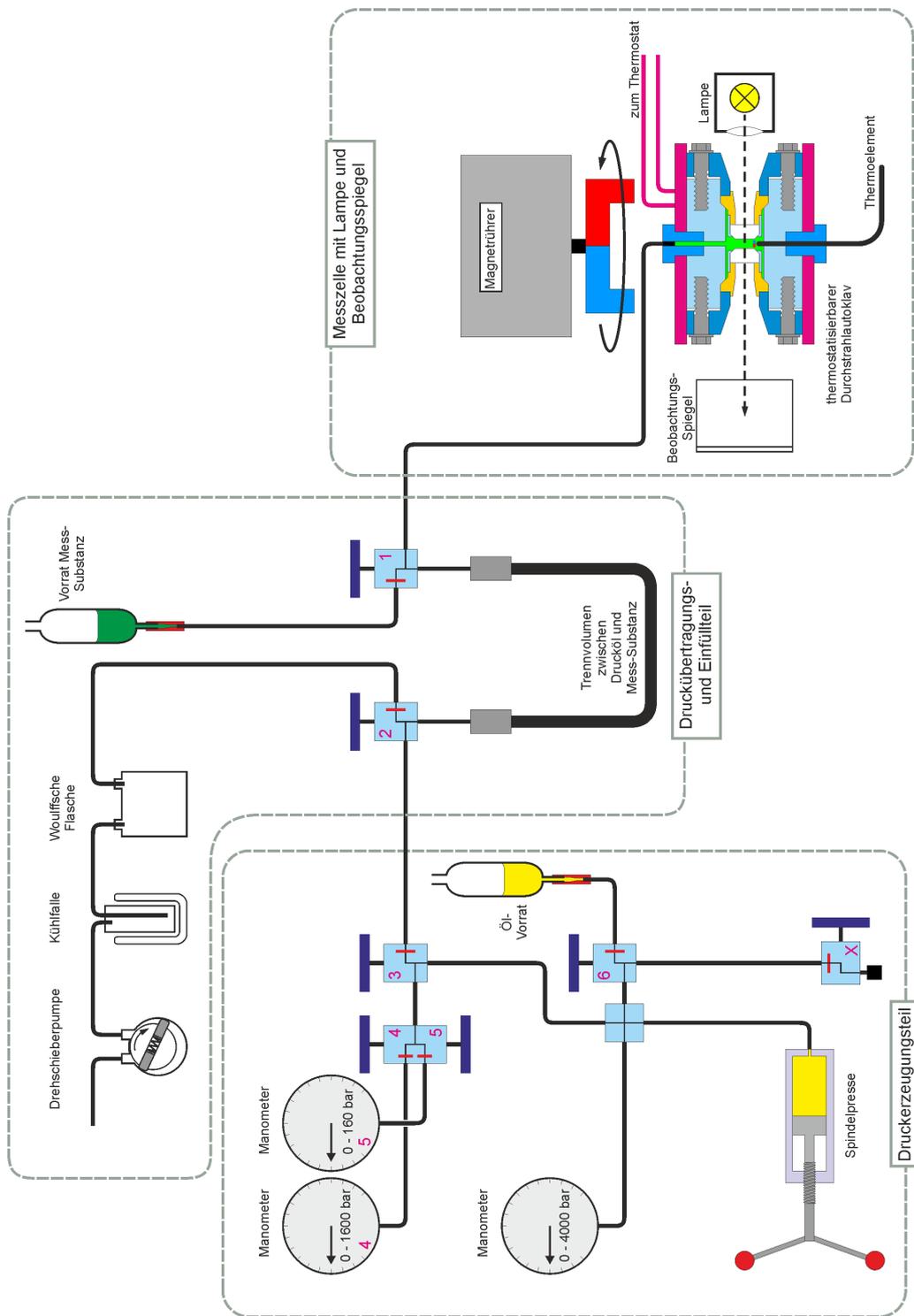


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Hochdruckapparatur

5. Thermoelement zur Temperaturmessung nahe an der Probe. Es handelt sich um ein so genanntes „Chromel-Alumel“-Mantelthermoelement (internationale Bezeichnung: Typ K), dessen positiver Schenkel aus einer Nickel-Chrom-Legierung und dessen negativer Schenkel aus einer Nickel-Aluminium-Legierung bestehen. Eine Thermospannungstabelle befindet sich im Anhang.

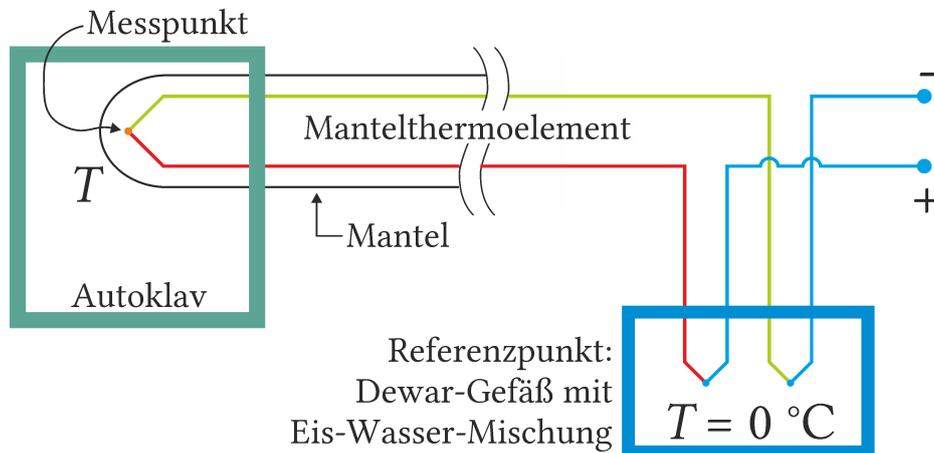


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Thermoelements

3.3 Durchführung der Messung

3.3.1 Füllen des Druckerzeugungsteils mit Hydrauliköl:

Diese Prozedur ist meist nicht erforderlich, lesen Sie weiter bei 3.3.2.

Zunächst wird bei geschlossenem Ventil 3 und geöffnetem Ventil 6 durch langsames Herausdrehen der Spindel (gegen den Uhrzeigersinn) Drucköl aus dem Vorratsgefäß angesaugt. Dann wird Ventil 6 geschlossen und bei weiterhin geschlossenem Ventil 3 auf Dichtigkeit der Apparatur geprüft. Zu diesem Zweck wird die Spindelpresse im Uhrzeigersinn gedreht, bis etwa 100 bar erreicht werden. Erreicht man auch nach 1 bis 3 Umdrehungen noch keinen signifikanten Druckanstieg, so muss der Füllvorgang (evtl. mehrmals) wiederholt werden. Danach ist sichergestellt, dass der Druckerzeugungsteil vollständig mit Hydrauliköl gefüllt ist. Für den Beginn der folgenden Messungen wird der Druck im Druckerzeugungsteil auf etwa 300 bar eingestellt. Ventil 6 bleibt jetzt dauerhaft geschlossen, Ventil 3 ist zunächst auch geschlossen und wird erst bei Beginn der Messung geöffnet.

3.3.2 Füllen der Messzelle:

Überzeugen Sie sich, dass Ventil 3 geschlossen ist. Das Befüll- und Entlüftungssystem zwischen den Ventilen 1 und 2 dient zur Abgrenzung des Hydrauliköls und der Messflüssigkeit. Die Kontaktzone der beiden Flüssigkeiten soll später im Bereich des U-Rohrs liegen. Ein Vermischen der beiden Flüssigkeiten in der Zelle muss verhindert werden.

1. Messflüssigkeit in den gläsernen Vorratsbehälter einfüllen. Im Verlauf des folgenden Spül- und Füllvorgangs muss darauf geachtet werden, dass immer genug Flüssigkeit vorhanden ist, da sonst Luft angesaugt werden könnte. Ventil 1 ist geschlossen.

Lampe und Rührer sind einzuschalten. Die Drehschieberpumpe ist einzuschalten und die Kühlfalle ist mit flüssigem Stickstoff zu befüllen.

2. Bei geöffnetem Ventil 2 wird die Zelle und das zugeschaltete Leitungssystem mit der Drehschieberpumpe über die Woulfesche Flasche und die Kühlfalle von Gemischresten des Vorgängerversuchs entleert und evakuiert.
3. Ventil 2 schließen und Ventil 1 öffnen. Die Messflüssigkeit wird in die Zelle und das angeschlossene Leitungssystem gesaugt. Die Flüssigkeit strömt über den Spiegel gut sichtbar in den Autoklav.
4. Die Schritte 2 und 3 sind mehrmals zu wiederholen, bis die Zelle und die Leitungen gut gespült sind. Nach der letzten Füllung darf im Autoklav keine Luftblase mehr sichtbar sein (im Spiegel gut zu beobachten).
5. Nun Ventile 1 und 2 schließen. Erhöhen Sie zunächst den Druck im Druckerzeugungsteil auf etwa 300 bar. Jetzt kann Ventil 3 geöffnet und die Zelle unter Druck gesetzt werden. **Es ist darauf zu achten, dass die Ventile 2 und 3 niemals gleichzeitig geöffnet sind.**
6. Durch Drehen der Spindelpresse im Uhrzeigersinn kann nun der Druck im Autoklav erhöht werden. Man stelle den Druck im System auf 300 bar ein und beobachte über einige Minuten. Der Druck darf keinesfalls von alleine absinken. Gegebenenfalls müssen die Ventile 1 oder 2 fester angezogen werden.

3.3.3 Aufzeichnen der kritischen Kurven in der p - T -Ebene bei konstanter Konzentration x_c

1. Zunächst wird die Zelle bei Raumtemperatur auf einen Anfangsdruck von etwa 50 bar gesetzt. Danach wird der Ölthermostat eingeschaltet. Dazu wird zunächst der Ölkreislauf durch Einschalten des Netz-Drehschalters an der Relaisbox in Betrieb gesetzt (siehe Abb. 5). An der Relaisbox darf niemals der Knopf *Aufheizen* gedrückt werden, da dieser den Energieregler (Drehknopf rechts) übersteuert. Der Autoklav würde dann viel zu schnell aufgeheizt. Der Energieregler wird zunächst auf Stufe 3 gestellt. Nach der ersten Beobachtung einer Phasentmischung kann er auf 4 eingestellt werden. Zum Starten des Aufheizens wird nun am Regler (PTR-Regler) eine Zieltemperatur von 160 °C eingestellt und der Regler anschließend eingeschaltet.
2. Man beobachtet die Probe durch den Spiegel und notiert den Druck und die Temperatur, bei der sie sich entmischt (erst Schlieren, dann Trübung!).
3. Möglichst zügig nach Auftreten der Trübung wird der Druck mit der Spindelpresse (Drehung im Uhrzeigersinn) gesteigert, bis die Mischung wieder homogen wird.



Abbildung 5: Links Temperatur-Regler, rechts Relaisbox

4. Während die Temperatur weiter langsam und kontinuierlich ansteigt, entmischt das System wieder. Notieren Sie das neue T_c - p_c -Paar! Nun wieder den Druck steigern, um die Probe zu homogenisieren.
5. Oberhalb eines bestimmten Drucks sollte das System trotz steigender Temperatur keine Entmischung mehr zeigen. Die obere kritische und die untere kritische Kurve laufen hier zusammen und bilden ein Druckmaximum der kritischen Kurve (zur vorgeschlagenen Nomenklatur siehe BOLZ 1998⁴). Jetzt kann durch Verringerung des Drucks das Zweiphasengebiet erreicht werden (wieder p_c und T_c notieren!). Bei fortdauernder und langsamer Temperatursteigerung wird jetzt durch wiederholte Drucksenkung die obere kritische Kurve punktweise abgetastet.

3.3.4 Abschluss der Messungen:

Abschalten des Ölthermostats. **Dann unbedingt Ventil 3 schließen.** Die Zelle durch Öffnen von Ventil 2 leerpumpen und 2 min evakuieren. Dann sind alle Ventile zu schließen. Die Kühlfalle und die Woulfesche Flasche sind zu entleeren und zu reinigen (Entsorgung der Restsubstanz aus der Woulfeschen Flasche in die bereitgestellte Abfall-Flasche). Abschalten von Rührer und Lampe.

4 Darstellung der Messergebnisse und Auswertung

1. Stellen Sie die erhaltenen Phasenübergänge tabellarisch und in einem Temperatur-Druck-Diagramm $T(p)$ dar.
2. Bestimmen Sie die Koordinaten $(T_{c,max} | p_{c,max})$ des Druckmaximums der kritischen Kurve.
3. Ermitteln Sie die Druckabhängigkeit (lineare Regression, kein Polynom anpassen!) der unteren und oberen kritischen Kurve im Bereich kleiner Drücke (ca. 50 bis 300 bar). Extrapolieren Sie beide Kurven auf den Druck $p = 1$ bar und ermitteln

⁴Bei SCHNEIDER 1966 heißt dieser Punkt auch *hyperkritischer Punkt*

Sie so die obere und untere kritischen Temperatur bei Normaldruck. Vergleichen Sie diese Werte mit den Angaben bei ONKEN 1959.⁵ Stellen Sie für die linearen Abschnitte der oberen und unteren kritischen Kurven die y-Achsenabschnitte und Steigungen (mit deren Fehlern) tabellarsich dar. Achten Sie auf das korrekte Zahlenformat (wieviele signifikante Ziffern sollte man angeben?) und die korrekten Einheiten.

4. Berechnen Sie die Steigung der unteren kritischen Kurve. Benutzen Sie dazu die Originalmessungen von ONKEN 1959. Dort sind die molare Mischungsenthalpie $\Delta_{mix}H_m$ und das molare Mischungsvolumen $\Delta_{mix}V_m$ jeweils als Funktion der Konzentration x_{H_2O} veröffentlicht. Bedenken Sie, dass für die beiden thermodynamischen Zustandsfunktionen Enthalpie und Volumen (und nur für sie) gilt: $\Delta_{mix}H = H^E$ und $\Delta_{mix}V = V^E$. Vergleichen Sie dieses berechnete Ergebnis mit Ihrer Messung unter Aufgabenteil 3.

Zur Lösung dieses Aufgabenteils gehen Sie sinnvollerweise so vor: Fitten Sie die Messdaten, die ONKEN 1959 in der Nähe der kritischen Konzentration $x_{H_2O} = 0,94$ gemessen hat, mit einer passenden Funktion an. Anschließend bestimmen Sie die Kurvenkrümmung bei $x_{H_2O} = 0,94$. Verwenden Sie dann Gleichung 9. Welches Ergebnis ist genauer: Das aus Aufgabenteil 3 oder 4?

5. Zeigen Sie, dass aus der Gleichung 5 die Gleichungen 6 und 7 folgen.
6. Prüfen Sie, ob die Mischungslücke der Regel des geradlinigen Durchmessers erfüllt (auch bekannt als Regel von Cailletet-Mathias). Es sollte dann die folgende Gleichung 10 gültig sein. Bestimmen Sie die Parameter A und B (mit Fehlern und Einheiten).

$$\frac{1}{2}(T_{c,oben} + T_{c,unten}) = A + B \cdot p \quad (10)$$

5 Anhang

5.1 Literatur

Neben den Lehrbüchern der Physikalischen Chemie:

- A. BOLZ, *Pure Appl. Chem.*, **70** (1998) 2233,
- R. HAASE, *Thermodynamik der Mischphasen*, Berlin (Springer) 1956,
- G. KORTÜM und H. LACHMANN, *Einführung in die chemische Thermodynamik*, Weinheim (Verlag Chemie) 1981,
- U. ONKEN, *Z. Elektrochem.* **63** (1959) 321,
- J. S. ROWLINSON und F. L. SWINTON, *Liquids and Liquid Mixtures*, London (Butterworth) 1982,
- G. SCATCHARD und G. M. WILSON, *J. Am. Chem. Soc.* **86** (1964) 133,
- G. SCHNEIDER und G. WILHELM, *Z. Phys. Chem. NF* **20** (1959) 219,

⁵Literatur liegt am Versuch aus.

G. M. SCHNEIDER, *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* **70** (1966) 497,
 G. M. SCHNEIDER, *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* **76** (1972) 325,

5.2 Thermoelementtabelle

Tabelle für Thermoelement Typ K (NiCr-Ni bzw. Chromel-Alumel) (Abb. 6)

	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
0	0.00	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36
10	0.40	0.44	0.48	0.52	0.56	0.60	0.64	0.68	0.72	0.76
20	0.80	0.84	0.88	0.92	0.96	1.00	1.04	1.08	1.12	1.16
30	1.20	1.24	1.28	1.32	1.36	1.40	1.44	1.49	1.53	1.57
40	1.61	1.65	1.69	1.73	1.77	1.81	1.85	1.90	1.94	1.98
50	2.02	2.06	2.10	2.14	2.18	2.23	2.27	2.31	2.35	2.39
60	2.43	2.47	2.51	2.56	2.60	2.64	2.68	2.72	2.76	2.80
70	2.85	2.89	2.93	2.97	3.01	3.05	3.10	3.14	3.18	3.22
80	3.26	3.30	3.35	3.39	3.43	3.47	3.51	3.56	3.60	3.63
90	3.68	3.72	3.76	3.81	3.85	3.89	3.93	3.97	4.01	4.06
100	4.10	4.14	4.18	4.22	4.26	4.31	4.35	4.39	4.43	4.47
110	4.51	4.55	4.60	4.64	4.68	4.72	4.76	4.80	4.84	4.88
120	4.92	4.96	5.01	5.05	5.09	5.13	5.17	5.21	5.25	5.29
130	5.33	5.37	5.41	5.45	5.49	5.53	5.57	5.61	5.65	5.69
140	5.73	5.77	5.81	5.85	5.89	5.93	5.97	6.01	6.05	6.09
150	6.13	6.17	6.21	6.25	6.29	6.33	6.37	6.41	6.45	6.49
160	6.53	6.57	6.61	6.65	6.69	6.73	6.77	6.81	6.85	6.89
170	6.93	6.97	7.01	7.05	7.09	7.13	7.17	7.21	7.25	7.29
180	7.33	7.37	7.41	7.45	7.49	7.53	7.57	7.61	7.65	7.69
190	7.73	7.77	7.81	7.85	7.89	7.93	7.97	8.01	8.05	8.09
200	8.13	8.17	8.21	8.25	8.29	8.33	8.37	8.41	8.46	8.50

Abbildung 6: Linke Spalte plus Kopfzeile: Temperatur in °C, Thermospannung in mV

5.3 Was man wissen sollte

Ideale und reguläre Mischungen, Mischungsgrößen, Exzessgrößen, partielle und integrale Mischungsgrößen, kritischer Punkt und kritische Phänomene

5.4 Hinweise für die Gefährdungsbeurteilung

Behandeln Sie folgende Aspekte in Ihrer versuchsspezifischen Gefährdungsbeurteilung:
 Hochdruck, Vakuum, N₂(liq), verwendete Substanzen, Elektrogeräte