

**WS2010**

---

**PPA2**

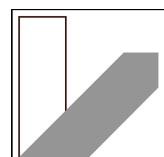
---

# Reale Gase

---

Achim Guckenberger - Markus Sesselmann

---



**it's CREATIVE SCHOOL.**

**26**

**D**

**kariert  
mit Rand**

PPA2, Versuch RG

Gruppe 17

Achim Guckenberger

Markus Sesselmann

[www.PaperZone.de](http://www.PaperZone.de)

DIN A4, 80g Papier aus chlorfrei gebleichtem Zellstoff, **32 Blatt**

# VERSUCH: REALES GAS UND VERFLÜSSIGUNG

## 1. Allgemeines

- Teilnehmer: Achim Guchenberger, Markus Lenzelmann
- Datum: 25.11.10
- Titel des Versuchs: Versuch RG
- Versuchsplatz: Apparatur 1
- Gruppennummer: 17
- Betreuer: Tobias Lang

Korr: 0,5

Korrektur: 3,5

Protokoll: 2,5

Korrektur: 10

$\Sigma \quad 16,5 \text{ P}$

## 2. Einführung und Ziel

Flüssigkeiten und Gase nehmen in der Physik als auch in der Technik eine wichtige Stellung ein, weshalb die genaue Kenntnis deren Eigenschaften, wie z.B. die Umwandlung zwischen beiden Phasen, notwendig ist.

Z.B. bei Hydrauliksystemen muss darauf geachtet werden, dass die Flüssigkeit stets in flüssiger Form vorliegt und nicht bei Unterdruck oder zu hoher Temperatur in den gasförmigen Zustand übergeht.

Dabei ist die naturgetreue Beschreibung von Gasen oftmals nicht trivial, da die Molekülwechselwirkung modellhaft nur sehr schwierig zu erfassen ist. Ein Annäherungsversuch hierfür ist die sog. van-der-Waals-Gleichung, welche in der Lage ist, den Phasenübergang flüssig-gasförmig mathematisch darzu-

stellen.

Der Ziel des Versuches ist folglich sich eingehender mit einem Gas, hier Schwefelhexafluorid ( $SF_6$ ), und den verschiedenen Systemparametern (Druck, Volumen, Temperatur) auseinanderzutreten, wobei das Augenmerk auf den Phasenübergang liegt.

### 3. Fragen zur Vorbereitung

#### Aufgabe 1

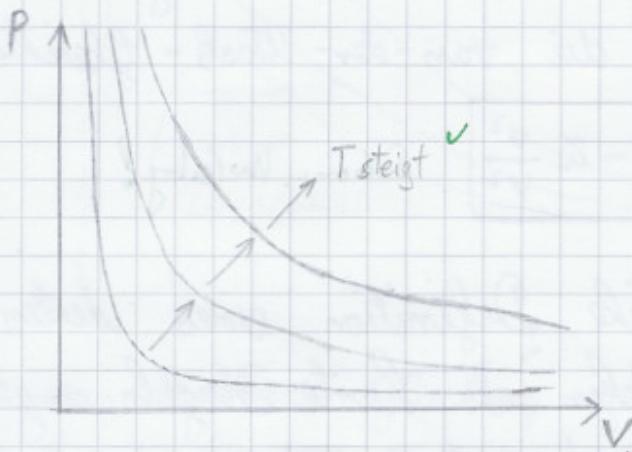
Ideale Gasgleichung:  $p(V,T) = \frac{vRT}{V}$  ✓

- mit:
- Druck  $p$
  - Volumen  $V$
  - Temperatur  $T$
  - Molare Gaskonstante  $R = 8,314 \frac{J}{mol K}$
  - Anzahl der Mole im Gas  $v$   
(Stoffmenge)

In folgenden Betrachtungen wird  $v$  als konstant angenommen.

Dann ist sofort ersichtlich, dass der Druck bei gegebenem Volumen linear mit der Temperatur zunimmt. Dies läuft sich mit der kinetischen Gastheorie anschaulich so erklären, dass die Teilchen bei höherer Temperatur eine höhere kinetische Energie besitzen, wodurch sie einen höheren Impuls auf die Gefäßwände ausüben, sodass der Druck steigt. Umgekehrt nimmt der Druck bei konstanter Temperatur und abnehmendem Volumen

nach zu, da die mittlere freie Weglänge der Teilchen kleiner wird, was zur Folge hat, dass sie häufiger auf die Gefäßwand auftreffen.



$$V: \rho = \text{const}$$

$$T = \text{const.}$$

$$V = \text{const.}$$

## Aufgabe 2

a) Das Problem der idealen Gasgleichung ist, dass sie den Phasenübergang flüssig-gasförmig nicht zu beschreiben vermag, da die intermolekulare Wechselwirkung vernachlässigt wird. Die Gleichung kann daher wie folgt modifiziert werden:

1. Aufgrund der abstoßenden Wechselwirkung ist das zur Verfügung stehende (Volumen im Behälter) kleiner

$$\Rightarrow \rho = \frac{vRT}{V - \Delta V} \quad \text{mit } \Delta V = v\tilde{b}$$

$\rightarrow$  reelle Ausdehnung der fiktiven

$\tilde{b}$  kann als das Eigenvolumen eines Moleküls interpretiert werden.  $\rightarrow$  Molekülgröße!

2. Aufgrund der anziehenden Wechselwirkung ist die Teilchengeschwindigkeit im Mittel kleiner, d.h. der Druck auf die Wand geringer

$$\Rightarrow p = \frac{vRT}{V-vb} - \Delta p \quad \text{mit } \Delta p = \tilde{\alpha} \left( \frac{v}{V} \right)^2$$

Das Quadrat röhrt daher, da weniger und langsamere Teilchen auf die Wände treffen. Der Parameter  $\tilde{\alpha}$  wird auch Binnendruck genannt. ✓ Damit ergibt sich die van-der-Waals-Gleichung:

$$p(V,T) = \frac{vRT}{V-vb} - \tilde{\alpha} \frac{v^2}{V^2} \quad \text{Schön! Wichtig!}$$

- b) Die anschauliche Definition eines idealen Gases ist, dass die Teilchen als harte Kugeln angesehen werden können und untereinander und mit den Wänden nur mittels elastischen Stößen wechselwirken, wobei die kinetische Energie der Teilchen die Temperatur des Gases definiert.
- c) Die Gleichung (2) im Skript R6-2 ergibt aus obiger Gleichung durch:

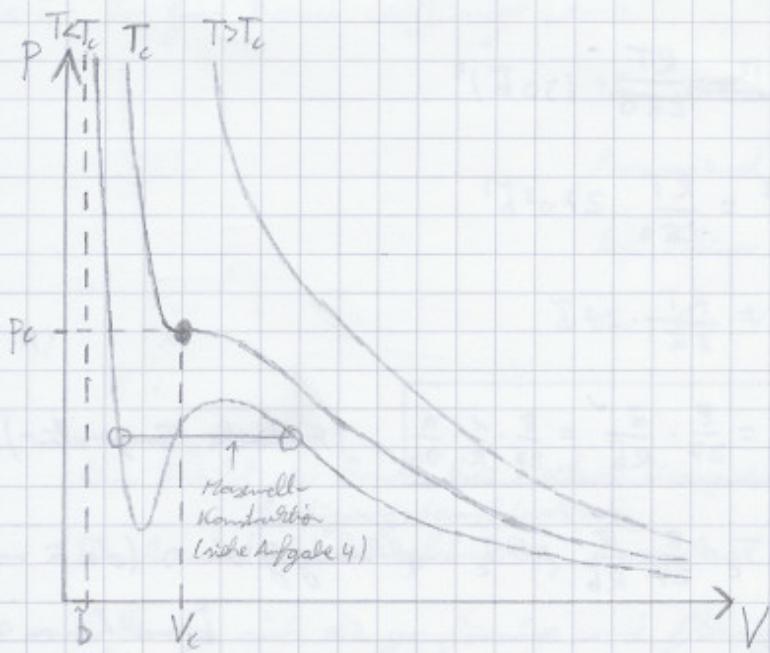
$$\begin{aligned} a &= \tilde{\alpha} \cdot v^2 \\ b &= \tilde{b} \cdot v \end{aligned}$$

Somit ergibt sich:  $(p + \frac{a}{V^2})(V-b) = vRT$

bzw.  $p(V,T) = \frac{vRT}{V-b} - \frac{a}{V^2}$

$b$  kann als das gesamte Eigenvolumen aller Moleküle betrachtet werden. ✓

$a$  bringt die gegenseitige Abstreuung aufgrund der van-der-Waals-Kräfte / London-Kräfte zum Ausdruck. ✓



Die van-der-Waals-Gleichung gilt in die ideale Gasgleichung für  $T \gg T_c$  über. ( $T_c$ : kritische Temperatur)  
Für  $T \leq T_c$  ergibt sich das ideale Gargeretr nur für große  $V$ .

Dabei ist stets  $b < V$ , d.h. die Moleküle können sich nicht überschneiden.

### Aufgabe 3

Bedingung für Wandpunkt:  $\frac{dp}{dV} = 0$  und  $\frac{d^2p}{dV^2} = 0$

$$\text{Van-der-Waals-Gleichung: } p(V, T) = \frac{RT}{V - b} - \tilde{\alpha} \cdot \frac{V^2}{V^2}$$

$$\frac{dp}{dV} = -\frac{RT}{(V-b)^2} + 2\tilde{\alpha} \cdot \frac{V^2}{V^3} \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow (V-b)^2 = \frac{RTV^3}{2\tilde{\alpha}} \quad (\#1)$$

$$\frac{d^2p}{dV^2} = \frac{2RT}{(V-b)^3} - 6\tilde{\alpha} \cdot \frac{V^2}{V^4} \stackrel{(\#1)}{=} \frac{2RT \cdot 2\tilde{\alpha}V}{(V-b) \cdot RTV^3} - 6\tilde{\alpha} \cdot \frac{V^2}{V^4} \stackrel{!}{=} 0$$

$$\frac{4V^2\tilde{\alpha}}{V^4 - V^3b} = 6\tilde{\alpha}V^2 \cdot \frac{1}{V^4}$$

$$\frac{2}{3} = \frac{V^4 - V^3b}{V^4} = 1 - \frac{b}{V}$$

$$\rightarrow V =: V_c = 3b \quad (\text{kritischer Volumen})$$

$\rightarrow$  Laut  $V_c = 3b$  hängt  $V_c$  von der Stoffmenge  $\tilde{\alpha}$  ab.

①

( $b$  ist wahlr. von 0)

→ Dies ist (#1):

$$(3\tilde{v}\tilde{b} - \tilde{v}\tilde{b})^2 = \frac{RT}{2\tilde{a}\tilde{v}} \cdot (3\tilde{v}\tilde{b})^3$$

$$4\tilde{v}^2\tilde{b}^2 = \frac{RT}{2\tilde{a}\tilde{v}} \cdot 27\tilde{v}^3\tilde{b}^3$$

$$1 = \frac{RT}{8\tilde{a}} \cdot 27\tilde{b}$$

$$\boxed{T = T_c = \frac{8}{27} \cdot \frac{\tilde{a}}{R\tilde{b}}} = \frac{8}{27} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{a}{v_b} \quad (\text{kritische Temperatur})$$

→ wegen  $T_c = \frac{8}{27} \cdot \frac{\tilde{a}}{R\tilde{b}}$  ist  $T_c$  unabh. von  $v$  (da  $\tilde{a}$  und  $\tilde{b}$  unabh. von  $v$  sind)

→  $V_c$  und  $T_c$  in die van-der-Waals-Gl. für  $p_c$ :

$$p_c = p(V_c, T_c) = \frac{\sigma R \cdot \frac{8}{27} \cdot \frac{\tilde{a}}{R\tilde{b}}}{3\tilde{v}\tilde{b} - \tilde{v}\tilde{b}} - \tilde{a} \cdot \frac{\tilde{v}^2}{9\tilde{b}^2} = \\ = \frac{8}{27} \cdot \frac{\tilde{a}}{2\tilde{b}} - \frac{\tilde{a}}{9\tilde{b}^2}$$

$$\boxed{p_c = \frac{1}{27} \cdot \frac{\tilde{a}}{\tilde{b}^2}} = \frac{1}{27} \cdot \frac{a}{b^2} \quad (\text{kritischer Druck})$$

→ wegen  $p_c = \frac{1}{27} \cdot \frac{\tilde{a}}{\tilde{b}^2}$  ist  $p_c$  unabh. von  $v$ .

#### Aufgabe 4

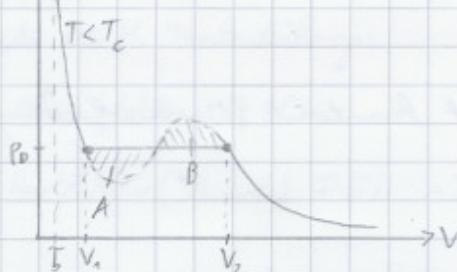
Gä in einem Gefäß nur Gas, wobei das Volumen des Gefäßes verringert werden kann. Dann gibt es 2 verschiedene Effekte bei Verringern des Volumens, je nach Temperatur:

1)  $T > T_c$ , d.h. die Gartemperatur liegt über der "Temperatur":

Das Gas verhält sich wärmungswise wie ein ideales Gas, d.h. es kann nicht verflüssigt werden. Die Isothermen haben nirgends eine waagrechte Tangente und die "realen" Isothermen stimmen mit denen, die sich direkt aus der van-der-Waals-Gl. ergeben, überein.

2)  $T < T_c$ : Das Gas kann verflüssigt werden.

P/V



Vom unendlichen Volumen

Kommend, nimmt der Druck

bei kleinen werdenden Volumen

zu, bis  $V = V_2$  erreicht ist.

Nun bleibt der Druck bei weiterer Kompression konstant. Dieser Sättigungsdampfdruck wird als Dampfdruck  $p_0$  berechnet. In diesem Gelist befinden sich die gasförmige und flüssige Phase in Gleichgewicht, d.h. im Gefäß liegt vorzüglich die Substanz sowohl als Gas (aber im Gefäß) als auch als Flüssigkeit (nur im Gefäß) vor. Je stärker komprimiert wird, desto mehr Flüssigkeit ist vorhanden.

Bei einem Volumen von  $V_1$  ist sämtliches Gas in die flüssige Phase übergetreten.

Bei noch stärkerer Kompression ( $V < V_1$ ) schwillt der Druck rasch nach oben („Flüssigkeiten lassen sich nicht komprimieren“).

Isotherme dr

An der Stelle des Phasenübergangs besteht die van-der-Waals-Gl. einer „Schleife“, anstatt konstant zu sein. Die reale Isotherme wird hiervon so konstruiert, dass die Blätter A und B (siehe Skizze) gleich sind („Maxwell-Konstruktion“).

Kennt man den Dampfdruck  $p_{01}$  bei einer Temperatur  $T_1$  und ist die Verdampfungenthalpie  $\Delta H_{\text{vap}}^\circ$  der Substanz bekannt, so läuft sich der Dampfdruck  $p_{02}$  bei einer Temperatur  $T_2$  näherungsweise über die Clausius-Clapeyron'sche Gleichung berechnen:

$$\ln \frac{p_{02}}{p_{01}} = \frac{\Delta H_{\text{vap}}^\circ}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (R: \text{Allg. Gaskonstante})$$

### Aufgabe 5

Es gilt als Zusammenhang zwischen Dichte  $\rho$  und Volumen  $V$ :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{m: Masse})$$

Die Dichte des Stoffs in der Gefäß ist konstant (Massenhal tung, da abgeschlossenes System)

$$\rightarrow \frac{\rho_{\text{fl}} - \rho_g}{\rho_c} = \frac{\frac{m}{V_{\text{fl}}} - \frac{m}{V_g}}{\frac{m}{V_c}} = V_c \cdot \left( \frac{1}{V_{\text{fl}}} - \frac{1}{V_g} \right)$$

$$\boxed{\frac{\rho_{\text{fl}} - \rho_g}{\rho_c} = V_c \cdot \left( \frac{1}{V_{\text{fl}}} - \frac{1}{V_g} \right)} \quad \checkmark$$

### Aufgabe 6

Quecksilber hat folgende Vorteile:

- In Gläsern ~~ist~~ tritt bei Quecksilber fast kein Kapillareffekt auf  
→ genaues Ablesen möglich ✓
- Quecksilber reagiert mit vielen Gasen nur selbstd (d.h. die Gase werden auch nicht gelöst)
- Bei Raumtemperatur ist der Dampfdruck sehr gering → bereits bei sehr geringem Druck ist Quecksilber komplett flüssig ✓
- Quecksilber als Zerflüssigkeitskenngröße ermöglicht Flüssigkeitsdruckmessungen
- Quecksilber ist in Gläsern gut sichtbar ✓
- Quecksilber benetzt Glas nicht → es bilden keine Tropfen am Glas hängen  
*Sehr gut!*

#### 4. Thermometer / Rastföller

- Thermometer  $0,5\text{ K}$  Schabstörung:

- Ablesefehler:  $0,25\text{ K}$

- Rastföller (Schrift S. F-5):  $\Delta T = 0,5\text{ K}$

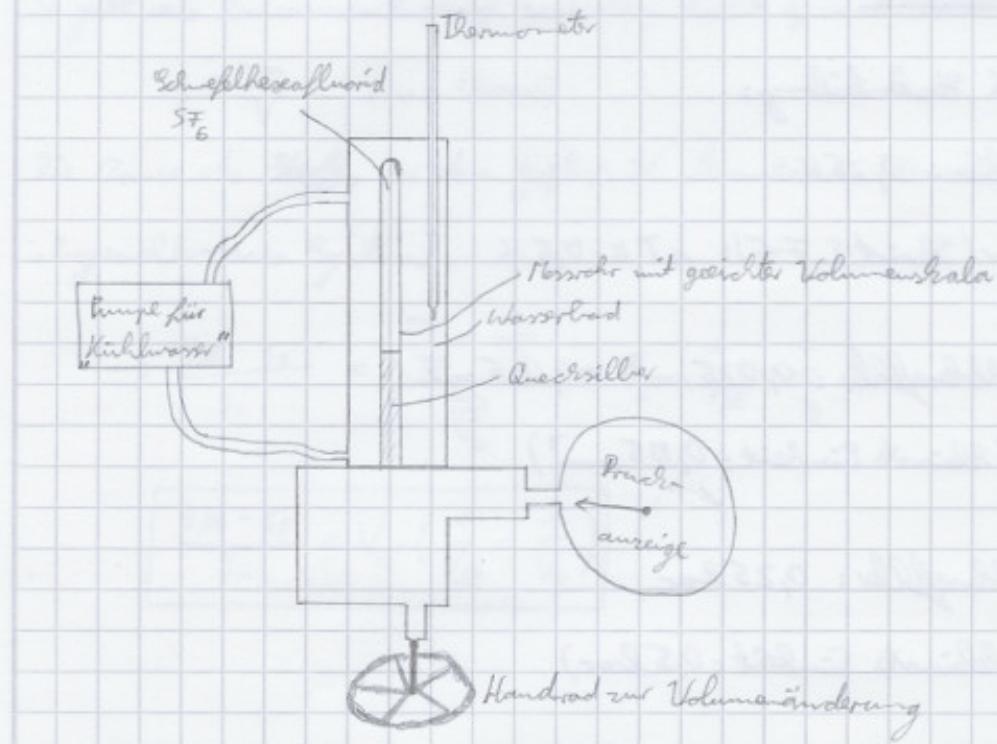
- Volumenstola: Ablesefehler:  $0,025\text{ cm}^3 = 0,025\text{ ml}$

( kleinste Einheit:  $0,05\text{ cm}^3$  )

- Druckstola: Ablesefehler:  $0,25\text{ bar}$

( kleinste Einheit:  $0,5\text{ bar}$  )

## 5. Versuchsaufbau und Durchführung



- Mit dem Handrad kann die Höhe der Gaszylinderhöhe und damit das Volumen des Gases im Messrohr modifiziert werden.
- Dieser Druck wird an der Druckanzeige dargestellt.
- Das Messrohr und dessen Inhalt wird durch das Wasserbad temperiert.

## Durchführung (allgemein)

- 1) Einstellen der gewünschten Temperatur (die dann Druck angezeigt wird).
- 2) 10 min auf Einstellen des Gleichgewichts warten.
- 3) Einstellen des gewünschten Volumens (Schrittwerte: ca.  $0,5 \text{ cm}^3$  in der Gasphase und ca.  $0,1 \text{ cm}^3$  im Verdampfungsraum)
- 4) Notation von eingesetzten Volumen und sich ablegendem Druck.
- 5) Falls 50 bar noch nicht erreicht wurden  $\rightarrow$  weiter mit Schritt 3).
  - Ansonsten: Wieder max. Volumen einstellen (so dass möglichst wenig Druck angezeigt wird) und wieder mit Schritt 1).

- Dabei soll das Ende und der Anfang des Zweiphasengebiets möglichst gut bestimmt werden.
- Beobachtungen, insbes. Nähe des kritischen Punktes, sind zu notieren.

- Bei einigen Punkten der Dampftafelkurve soll die Eichung überprüft werden. D.h. ob der Druck im Zweiphasengebiet bei einer best. Temperatur mit dem Literaturwert übereinstimmt.
- Das Volumen wird am ~~am~~ dritten Bereichsstück des Quecksilbers abgelesen (d.h. nicht am dritten Punkt des Quecksilbers).



## 6. Protokoll

### 6.1 Temperatur 1

- Uhrzeit der Temp.-änderung: 14:27 Uhr

Uhrzeit des eigtl. Versbeginns: 14:37 Uhr

Temperatur am Thermometer:  $21,5^{\circ}\text{C}$

- Messwerte:

Nr.	Volumen V/[cm <sup>3</sup> ]	Durchp/[bar]
1	4,00	8,50
2	3,50	9,50
3	3,00	11,00
4	2,50	13,00
5	2,00	15,75
6	1,50	19,25
7	1,30	21,00
8	1,20	21,50
9	1,10	21,50
10	1,00	21,50
11	0,90	21,50
12	0,80	21,75
13	0,70	21,75
14	0,60	22,00
15	0,50	22,25
16	0,40	22,50
17	0,30	23,00
18	0,20	25,50
19	0,17	48,25

## 6.2 Temperatur 2

- Uhrzeit der Temperaturänderung: 14:44 Uhr
- Uhrzeit des eigentlichen Messbeginns: 14:55 Uhr
- Temperatur am Thermometer:  $25,5^{\circ}\text{C}$

### - Meßreihe

Nr.	Volumen V/[cm <sup>3</sup> ]	Druck p/[bar]
1	4,00	8,50
2	3,50	9,75
3	3,00	11,50
4	2,50	13,50
5	2,00	16,00
6	1,50	19,75
7	1,30	23,50
8	1,20	22,50
9	1,10	23,50
10	1,00	23,75
11	0,90	23,75
12	0,80	23,75
13	0,70	24,00
14	0,60	24,00
15	0,50	24,00
16	0,40	24,50
17	0,30	25,00
18	0,20	28,50
19	0,18	43,00

Druckeinstellung: Referenzwert: 23,50 bar

### 6.3 Temperatur 3

- Uhrzeit der Temperaturänderung: 15:06 Uhr  
Uhrzeit des eigentlichen Messbeginns: 15:16 Uhr  
Temperatur am Thermometer: 30,5 °C

#### - Messreihe

Nr.	Volumen V/[cm³]	Druck p/[bar]
1	4,00	3,00
2	3,50	10,00
3	3,00	11,75
4	2,50	14,00
5	2,00	16,75
6	1,50	20,50
7	1,10	24,50
8	1,00	25,75
<hr/>		
ab hier zweiphasig		
9	0,90	27,00
10	0,80	27,00
11	0,70	27,00
12	0,60	27,00
13	0,50	27,25
14	0,40	27,50
15	0,30	28,00
<hr/> <u>bis hier</u>		
16	0,20	32,00
17	0,19	47,50

Druckrechnung: Referenzwert: 26,90 bar

## 6.4 Temperatur 4

- Uhrzeit der Temperaturänderung : 15:25 Uhr  
Uhrzeit des eigentlichen Messbeginns : 15:35 Uhr  
Temperatur am Thermometer :  $35,5^{\circ}\text{C}$

### - Messreihe

Nr.	Volumen V / [cm <sup>3</sup> ]	Druck p / [bar]
1	4,00	9,00
2	3,50	10,50
3	3,00	12,00
4	2,50	14,00
5	2,00	17,25
6	1,50	21,25
7	1,00	27,00
8	0,90	28,25
9	0,80	29,50
10	0,70	30,00
11	0,60	30,00
12	0,50	30,25
13	0,40	30,50
14	0,30	31,00
15	0,20	40,00
16	0,19	50,00

Druckrechnung : Referenzwert : 30,00 bar

## 6.5 Temperatur 5

- Uhrzeit der Temperaturänderung: 15:44 Uhr
- Uhrzeit des eigentlichen Messbeginns: 15:55 Uhr
- Temperatur am Thermometer:  $40,5^{\circ}\text{C}$

### - Messreihe

Nr.	Volumen V / [ $\text{cm}^3$ ]	Druck p / [bar]
1	4,00	9,75
2	3,50	10,50
3	3,00	12,25
4	2,50	14,50
5	2,00	17,50
6	1,50	21,75
7	1,00	28,00
8	0,90	29,50
9	0,80	31,00
10	0,70	32,50
<hr/>		
ab hier zweiphasig	11	0,60
	12	0,50
	13	0,40
<hr/>		
bis hier	14	0,30
	15	0,20

Druckeichung: Referenzwert: 33,50 bar

## 6.6 Temperatur 6

- Uhrzeit der Temperaturänderung: 16:03 Uhr

Uhrzeit des eigentlichen Messbeginns: 16:13 Uhr

Temperatur am Thermometer:  $43,5^{\circ}\text{C}$

- Messreihe

Nr.	Volumen $V / [\text{cm}^3]$	Druck $p / [\text{bar}]$
1	4,00	9,50
2	3,50	10,75
3	3,00	12,50
4	2,50	15,00
5	2,00	17,75
6	1,50	22,75
7	1,00	28,75
8	0,90	30,50
9	0,80	32,00
10	0,70	33,75
11	0,60	35,00 ab hier zweiphasig
12	0,50	36,00
13	0,40	36,50
14	0,30	37,00 bis hier
15	0,20	48,50

Beobachtung: Flüssige und gasförmige Phase ist schwer zu unterscheiden

Druckberechnung: Referenzwert: 35,60 bar

## 6.7 Temperatur 7

- Uhrzeit der Temperaturänderung : 16:27 Uhr
- Uhrzeit des eigentlichen Menübeginns: 16:37 Uhr
- Temperatur am Thermometer: 45,5°C

### - Menükarte

Nr.	Volumen V / [cm³]	Druck p / [bar]
1	4,00	9,75
2	3,50	11,00
3	3,00	12,75
4	2,50	15,00
5	2,00	17,00
6	1,50	22,50
7	1,00	29,50
8	0,90	31,00
9	0,80	32,50
10	0,70	34,50
11	0,60	36,00
12	0,50	37,50
13	0,40	38,00
14	0,30	38,50
15	0,20	50,00

Während der Volumenverkleinerung ist keine flüssige Phase mehr erkennbar. Bei der Vergrößerung ist „überer Dampf“ zu sehen.

## 6. 8 Temperatur 8

- Uhrzeit der Temperaturänderung: 16:46 Uhr
- Uhrzeit des eigentlichen Messbeginns: 16:56 Uhr
- Temperatur am Thermometer:  $48,5^{\circ}\text{C}$

### - Messreihe

Nr.	Volumen V / [cm <sup>3</sup> ]	Druck p / [bar]
1	4,00	10,0
2	3,50	11,25
3	3,00	13,00
4	2,50	15,50
5	2,00	18,50
6	1,50	23,00
7	1,00	30,00
8	0,90	37,50
9	0,80	33,50
10	0,70	35,50
11	0,60	37,50
12	0,50	39,00
13	0,40	40,25
14	0,30	41,50
15	0,25	49,50

### 6.3 Temperatur 3

- Uhrzeit der Temperaturänderung : 17:03 Uhr
- Uhrzeit des eigentlichen Messbeginns: 17:13 Uhr
- Temperatur des Thermometer:  $53,5^{\circ}\text{C}$

#### - Messreihe

Nr.	Volumen V / [cm <sup>3</sup> ]	Druck p / [bar]
1	4,00	10,00
2	3,50	11,50
3	3,00	13,25
4	2,50	15,50
5	2,00	18,25
6	1,50	23,50
7	1,00	31,00
8	0,90	32,75
9	0,80	34,75
10	0,70	37,00
11	0,60	39,25
12	0,50	41,50
13	0,40	43,50
14	0,30	46,00
15	0,25	48,50

## 6.10 Temperatur 10

- Uhrzeit der Temperaturänderung : 17:28 Uhr  
Uhrzeit des eigentlichen Messbeginns: 17:38 Uhr  
Temperatur des Thermometers: 58,5 °C

### - Messreihe

Nr.	Volumen V / [cm³]	Druck p / [bar]
1	4,00	10,25
2	3,50	11,50
3	3,00	13,50
4	2,50	16,00
5	2,00	19,25
6	1,50	24,00
7	1,00	32,75
8	0,90	34,75
9	0,80	36,50
10	0,70	39,25
11	0,60	41,50
12	0,50	44,00
13	0,40	47,00
14	0,30	51,00

## 7. Auswertung

### 7.1 p-V-Diagramm, Dampfdruckkurve, kritische Werte

#### 7.1.1 p-V-Diagramm

Die p-V-Diagramme für die versch. Temperaturen können direkt nach den Wertetabellen S. 12 - 21 gezeichnet werden.

Die Ziffern sind nach S. 9 wie folgt (jeweils Konstante):

$$- \text{Volumen: } s_V = 0,025 \text{ cm}^3 \hat{=} 0,1 \text{ cm im Diagramm}$$

$$- \text{Druck: } s_p = 0,25 \text{ bar} \hat{=} 0,1 \text{ cm im Diagramm}$$

(Restziffern sind unbekannt  $\rightarrow$  werden vernachlässigt.)

Die Ziffern sind fast zu klein zum Einzeichnen und werden deshalb der Übersicht halber weggelassen. Als Näherung kann man jedoch die Höhe / Breite der Kreise heranziehen. ✓

## 7. Auswertung

### 7.1 p-V-Diagramm, Dampftafelkurve, Sitzende Werte

$p$  in [bar]

↑

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

2,5

0

Temp. 1

Temp. 2

Temp. 3

Temp. 4

Temp. 5

Temp. 6

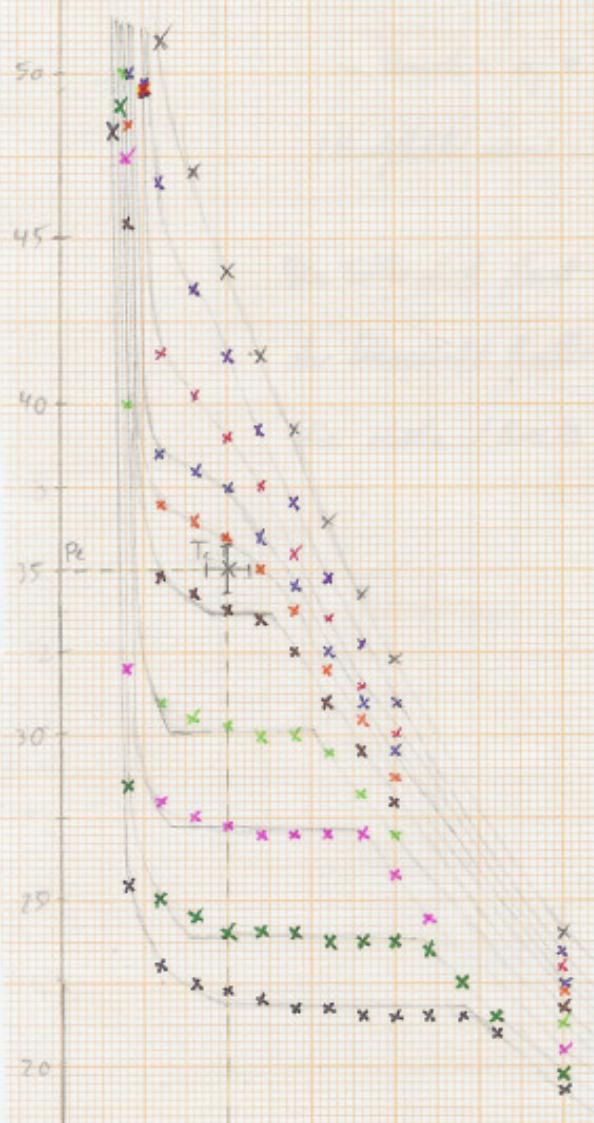
Temp. 7

Temp. 8

Temp. 9

Temp. 10

zu 7.1.1



↓  
Sitzende  
Werte

V in [cm³]

V

↓

0,5

1 1,25 1,5

2 2,5

3 3,5

4

### 7.1.2 Dampfdruckkurve

Die Dampfdruckkurve entsteht, wenn man den Dampfdruck (also den Druck, welcher im Bereich der waagrechten Tangenten im p-V-Diagramm) gegen die zugehörige Temperatur aufträgt.

Theoretisch sollte sowohl am Anfang als auch am Ende des Zweiphasengebiets ein Knick auftreten (im p-V-Diagramm), dieser ist jedoch oft (v.a. am Ende des Gebietes) nur abschätzbar.

Es werden daher für die Konstruktion nur die Werte verwendet, die innerhalb der Dampfdruckkurve des Bereichs des Zweiphasengebiets im p-V-Diagramm liegen.

Hierbei wird der Mittelwert der Werte innerhalb des Zweiphasenbereichs gebildet.

Mittelwert:

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i$$

mit  $p_i$ : Druckwert innerhalb des Bereichs

Je nach Temperatur ist die Gerade des Bereichs unterschiedlich lang, d.h. die Anzahl der Messwerte variiert je nach Temperatur, d.h.  $n$  ist unterschiedlich.

Fehler:

- Abtastfehler:  $\Delta p_a = 0,25 \text{ bar}$   
(Fehler ist hier konstant)

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{Praktel}} &= \Delta p_n = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial p_j} \Delta p_a \right)^2} = \Delta p_a \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial \bar{p}}{\partial p_j} \right)^2} = \\ &= \Delta p_a \sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{n} \right)^2} = \frac{\Delta p_a}{n} \sqrt{\sum_{j=1}^n 1} = \frac{\Delta p_a}{\sqrt{n}} \end{aligned}$$

$$\Delta p_{\text{Praktel}} = \frac{\Delta p_a}{\sqrt{n}}$$

$\rho$  in  $\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$

60

55

50

45

40

35

30

25

20

15

10

5

0

-5

-10

-15

-20

-25

-30

-35

-40

-45

-50

-55

-60

-65

-70

-75

-80

-85

-90

-95

-100

-105

-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

-255

-260

-265

-270

-275

-280

-285

-290

-295

-300

-305

-310

-315

-320

-325

-330

-335

-340

-345

-350

-355

-360

-365

-370

-375

-380

-385

-390

-395

-400

-405

-410

-415

-420

-425

-430

-435

-440

-445

-450

-455

-460

-465

-470

-475

-480

-485

-490

-495

-500

-505

-510

-515

-520

-525

-530

-535

-540

-545

-550

-555

-560

-565

-570

-575

-580

-585

-590

-595

-600

-605

-610

-615

-620

-625

-630

-635

-640

-645

-650

-655

-660

-665

-670

-675

-680

-685

-690

-695

-700

-705

-710

-715

-720

-725

-730

-735

-740

-745

-750

-755

-760

-765

-770

-775

-780

-785

-790

-795

-800

-805

-810

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

-815

Wertetabelle: ✓

Temperatur  $T$  [K] Mittelwert des Drucks  $\bar{p}$  [bar] Fehler  $s_{p_m}$  [bar]

$21,5^\circ\text{C} = 294,7 \text{ K}$	21,84	0,08
$25,5^\circ\text{C} = 298,7 \text{ K}$	24,03	0,08
$30,5^\circ\text{C} = 303,7 \text{ K}$	27,25	0,09
$35,5^\circ\text{C} = 308,7 \text{ K}$	30,35	0,11
$40,5^\circ\text{C} = 313,7 \text{ K}$	34,06	0,13
$43,5^\circ\text{C} = 316,7 \text{ K}$	36,13	0,13

Fehler der Temperatur (konstant):

$$s_T = \sqrt{s_{T_A}^2 + s_{T_B}^2} = \sqrt{(0,75 \text{ K})^2 + (0,50 \text{ K})^2} = 0,899016994 \text{ K} \\ = 0,9 \text{ K}$$

Beim Diagramm der Dampfdruckkurve wurden die Fehlerbalken des Drucks ( $s_{p_m}$ ) nicht mit eingerechnet, da diese in der Größenordnung der Kreuzmarkierungen der Messwerte liegen und somit auch im Bereich des Ablesefellers des Millimeterpapiers.

### 7.1.3 Bestimmung der kritischen Werte $V_c$ , $p_c$ , $T_c$ :

Anhand des  $p$ - $V$ -Diagramms von 7.1.1 lässt sich erkennen, in welchem Bereich der kritische Punkt liegen muss. Dieser Bereich wurde auch im  $p$ - $V$ -Diagramm eingerechnet, so dass man die kritischen Werte eingrenzen kann.

$$V_c = (0,50 \pm 0,08) \text{ cm}^3$$

$$p_c = (35,0 \pm 0,8) \text{ bar} \quad \checkmark$$

$T_c$  liegt etwa in der Mitte zwischen Temperatur 5 und Temperatur 6.

$$T_c = (42,0 \pm 0,6)^\circ\text{C} = (315,2 \pm 0,6)\text{K}$$

Literaturwerte aus „Handbuch der reinen Gase“ von Helmut Schön, 1. Auflage 2005, Springer-Verlag, S. 351:

$$T_c = 45,47^\circ\text{C}$$

$$p_c = 37,60 \text{ bar}$$

Die berechneten Werte und die Literaturwerte stimmen nicht im Fehlerintervall überein, die Abweichung ist allerdings nicht groß.

Vergleich von  $V_c$  mit dessen Literaturwert: S. 43

✓: Abweichung wohl wahr?

## 7.2 Virialkoeffizient B(T) und verwendete Gasmenge

### 7.2.1 Zeichnung der $pV - \frac{1}{V}$ -Diagramme

- Fehler von  $x := \frac{1}{V}$ :

$$\sigma_x = \sigma_V = \left| \frac{\partial \frac{1}{V}}{\partial V} \cdot \sigma_V \right| = \frac{1}{V^2} \sigma_V$$

- Fehler von  $p \cdot V$ :

$$\sigma_{pV} = \sqrt{\left( \frac{\partial(pV)}{\partial p} \cdot \sigma_p \right)^2 + \left( \frac{\partial(pV)}{\partial V} \cdot \sigma_V \right)^2} =$$

$$= \sqrt{(V \cdot \sigma_p)^2 + (\rho \cdot \sigma_V)^2}$$

mit  $\sigma_p = 0,25 \text{ bar}$ ,  $\sigma_V = 0,025 \text{ cm}^3$  (siehe S. 9).

$\rho$  und  $V$  sind die Werte aus den Tabellen des Protokolls (S. 12 - 21).

- Es werden für die Diagramme nur Werte verwendet, für die  $0 < \frac{1}{V} \leq 1,0 \frac{1}{\text{cm}^3}$  bzw.  $V \geq 1,0 \text{ cm}^3$  gilt. Nicht verwendete Werte sind in den Wertetabellen grau unterlegt.

### 7.2.2 Bestimmung von $\sigma$ für eine best. Temperatur

- Sei  $A := \lim_{\frac{1}{V} \rightarrow 0} (pV)$  der Achsenabschnitt der Diagramme von 7.2.1 der  $pV$ -Achse und  $\sigma_A$  ihr Fehler/Bestimmung des Fehlers (siehe S. 27).

Dann gilt nach Gl. 5. Rg.-4:

$$A = \sigma RT \quad (R: \text{allg. Gaskonstante})$$

$$\rightarrow \sigma = \frac{A}{RT} =: \sigma_i$$

$\sigma_i$  ist die Stoffmenge, wie man sie mit Hilfe der Tabelle / Diagramm für die Temperatur  $i$  bestimmt.

- Fehler von  $v_i$ :

$$s_{v_i} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_i}{\partial A} \cdot s_A\right)^2 + \left(\frac{\partial v_i}{\partial T} \cdot s_T\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{s_A}{RT}\right)^2 + \left(\frac{A}{RT^2} \cdot s_T\right)^2}$$

$$\text{mit } s_T = \sqrt{(0,25\text{ K})^2 + (0,5\text{ K})^2} \quad (\text{Fehler der Temperatur, S.9}).$$

- Der Achsenabschnitt  $A$  wird mittels Extrapolation der (mittleren) Geraden bestimmt.

Für den Fehler  $s_A$  von  $A$  werden 2 weitere Geraden eingeschätzt, und zwar so, dass diese beiden Geraden in etwa die Geradengleichung mit der kleinste bzw. größtmöglichen Steigung, welche innerhalb der Fehler möglich sind, repräsentieren.

Die Gerade mit der größeren Steigung erhält den Index  $\sigma$ , die mit der kleinere den Index  $\mu$ .

Damit erhält man die Achsenabschnitte  $A_\sigma$  bzw.  $A_\mu$  dieser beiden Geraden und der Fehler von  $A$  wird wie folgt abgeschätzt:

$$s_A \approx \frac{1}{2} \cdot (A_\sigma - A_\mu)$$

- Die allg. Gaskonstante  $R$  wird als fehlerfrei angenommen und beträgt nach „Physikalische Formeln und Tabellen“ (Hamer/Hamer, J. Lindauer Verlag, 8. Auflage, S.80):

$$R = 8,3145 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$$

- Für die jeweiligen Werte von  $A$ ,  $s_A$ ,  $v_i$  und  $s_{v_i}$  siehe die Diagramme und Tabellen.

### 7-2-3 Bestimmung von $B(T)$ für eine best. Temperatur

- Sei  $s := \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\partial(\rho V)}{\partial(\Delta V)}$  die Steigung der Geraden und  $s_s$  ihr Fehler.

Dann gilt nach Gl. 5.R.G-4:

$$s = \sum_i^2 RT \cdot B(T)$$

$$\rightarrow B(T) = \frac{s}{\sum_i^2 RT}$$

Dies ist der Virialkoeffizient für eine best. Temperatur  $T$ .

- Fehler von  $B(T)$ :

$$s_B = \sqrt{\left(\frac{\partial B}{\partial s} \cdot s_s\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial s_i} \cdot s_{s_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial T} \cdot s_T\right)^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{s_s}{\sum_i^2 RT}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot s}{\sum_i^2 RT} \cdot s_{s_i}\right)^2 + \left(\frac{s}{\sum_i^2 RT^2} \cdot s_T\right)^2}$$

- Die Steigung  $s$  wird mithilfe der (mittleren) Geraden bestimmt (vgl. Diagramme):

$$s = \frac{\Delta(\rho V)}{\Delta(\frac{1}{V})} =: \frac{\Delta y}{\Delta x} < 0$$

Der Fehler  $s_s$  wird aus den Steigungen der beiden „äußeren“ Geraden abgeschätzt (analog zu 5.27):

$$s_s \approx \frac{1}{2} \left| \left( \frac{\Delta(\rho V)_o}{\Delta(\frac{1}{V})} - \frac{\Delta(\rho V)_u}{\Delta(\frac{1}{V})} \right) \right| =: \frac{1}{2} \left| \frac{\Delta y_{max}}{\Delta x} - \frac{\Delta y_{min}}{\Delta x} \right|$$

Wertet ist  $\Delta x = 1 \text{ cm}^{-3}$ .

## Temperatur 1

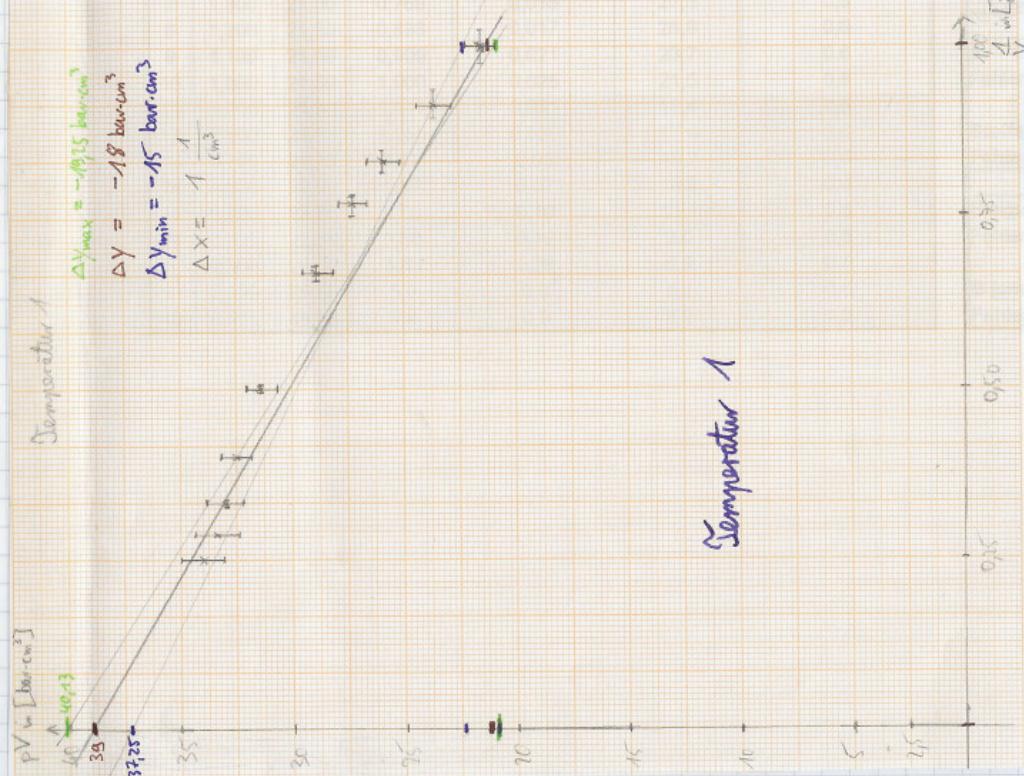
Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	8,50	0,2500	0,0016	34,0	1,0
2	3,500	9,50	0,2857	0,0020	33,3	0,9
3	3,000	11,00	0,3333	0,0028	33,0	0,8
4	2,500	13,00	0,400	0,004	32,5	0,7
5	2,000	15,75	0,500	0,006	31,5	0,6
6	1,500	19,25	0,667	0,011	28,9	0,6
7	1,300	21,00	0,769	0,015	27,3	0,6
8	1,200	21,50	0,833	0,017	25,8	0,6
9	1,100	21,50	0,909	0,021	23,7	0,6
10	1,000	21,50	1,000	0,025	21,5	0,6
11	0,900	21,50	1,111	0,031	19,4	0,6
12	0,800	21,75	1,250	0,039	17,4	0,6
13	0,700	21,75	1,43	0,05	15,2	0,6
14	0,600	22,00	1,67	0,07	13,2	0,6
15	0,500	22,25	2,00	0,10	11,1	0,6
16	0,400	22,50	2,50	0,16	9,0	0,6
17	0,300	23,00	3,33	0,28	6,9	0,6
18	0,200	25,50	5,0	0,6	5,1	0,6
19	0,170	48,25	5,9	0,9	8,2	1,2

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	21,5
Temperatur T [K]	294,7
Fehler T [K]	0,6
R [ $J_{(mol K)}$ ]	8,3145
pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	39,0
Fehler pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	1,4
Stoffmenge v [mol]	0,00159
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,00006
Steigung pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	-18,0
Fehler Steig. pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	2,1
B [cm <sup>3</sup> /mol]	-290
Fehler B [cm <sup>3</sup> /mol]	40

### Temperatur 1

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	8,50	0,2500	0,0016	34,0	1,0
2	3,500	9,50	0,2857	0,0020	33,3	0,9
3	3,000	11,00	0,3333	0,0028	33,0	0,8
4	2,500	13,00	0,400	0,004	32,5	0,7
5	2,000	15,75	0,500	0,006	31,5	0,6
6	1,500	19,25	0,6667	0,011	30,0	0,5

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	21,5
Temperatur T [K]	294,7
Fehler T [K]	0,6



x <sub>1</sub>	8,3145
[bar cm <sup>3</sup> ]	39,0
pV → 0 [bar cm <sup>3</sup> ]	1,4
menge v [mol]	0,00159
Stoffmenge v [mol]	0,00006
ng pV → 0 [bar cm <sup>3</sup> ]	-18,0
Steig. pV → 0 [bar cm <sup>3</sup> ]	2,1
/mol]	-290
r B [cm <sup>3</sup> /mol]	40

Temperatur 2

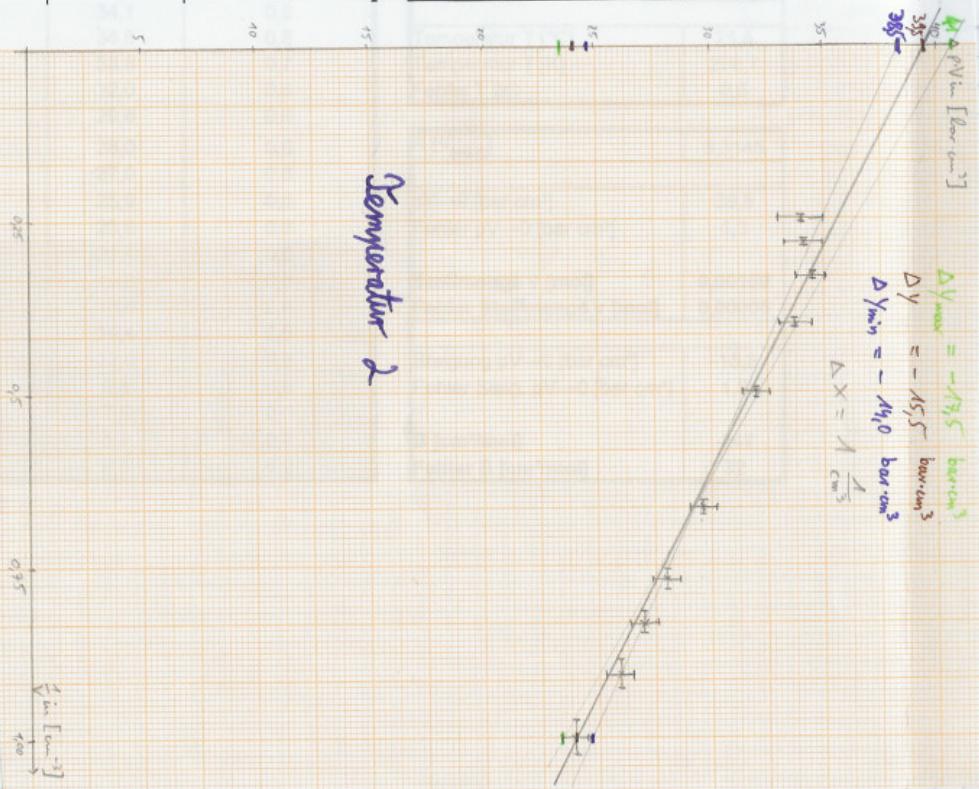
Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	8,50	0,2500	0,0016	34,0	1,0
2	3,500	9,75	0,2857	0,0020	34,1	0,9
3	3,000	11,50	0,3333	0,0028	34,5	0,8
4	2,500	13,50	0,400	0,004	33,8	0,7
5	2,000	16,00	0,500	0,006	32,0	0,6
6	1,500	19,75	0,667	0,011	29,6	0,6
7	1,300	21,50	0,769	0,015	28,0	0,6
8	1,200	22,50	0,833	0,017	27,0	0,6
9	1,100	23,50	0,909	0,021	25,9	0,6
10	1,000	23,75	1,000	0,025	23,8	0,6
11	0,900	23,75	1,111	0,031	21,4	0,6
12	0,800	23,75	1,250	0,039	19,0	0,6
13	0,700	24,00	1,43	0,05	16,8	0,6
14	0,600	24,00	1,67	0,07	14,4	0,6
15	0,500	24,00	2,00	0,10	12,0	0,6
16	0,400	24,50	2,50	0,16	9,8	0,6
17	0,300	25,00	3,33	0,28	7,5	0,6
18	0,200	28,50	5,0	0,6	5,7	0,7
19	0,180	49,00	5,6	0,8	8,8	1,2

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	25,5
Temperatur T [K]	298,7
Fehler T [K]	0,6
R [ $\frac{J}{(mol \cdot K)}$ ]	8,3145
pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	39,5
Fehler pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	1,3
Stoffmenge v [mol]	0,00159
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,00005
Steigung pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	-15,5
Fehler Steig. pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	1,8
B [cm <sup>3</sup> /mol]	-247
Fehler B [cm <sup>3</sup> /mol]	32

Temperatur 2

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	8,50	0,2500	0,0016	34,0	1,0
2	3,500	9,75	0,2857	0,0020		
3	3,000	11,50	0,3333	0,0028		
4	2,500	13,50	0,400	0,004		
5	2,000	16,00	0,500	0,006		
6	1,500	19,75	0,667	0,011		
7	1,300	21,50	0,769	0,015		
8	1,200	22,50	0,833	0,017		
9	1,100	23,50	0,909	0,021		
10	1,000	23,75	1,000	0,025		
11	0,900	23,75	1,111	0,031		
12	0,800	23,75	1,250	0,039		
13	0,700	24,00	1,43	0,05		
14	0,600	24,00	1,67	0,07		
15	0,500	24,00	2,00	0,10		
16	0,400	24,50	2,50	0,16		
17	0,300	25,00	3,33	0,28		
18	0,200	28,50	5,0	0,6		
19	0,180	49,00	5,6	0,8		

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25



Temperatur 3

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	9,00	0,2500	0,0016	36,0	1,0
2	3,500	10,00	0,2857	0,0020	35,0	0,9
3	3,000	11,75	0,3333	0,0028	35,3	0,8
4	2,500	14,00	0,400	0,004	35,0	0,7
5	2,000	16,75	0,500	0,006	33,5	0,7
6	1,500	20,50	0,667	0,011	30,8	0,6
7	1,100	24,50	0,909	0,021	27,0	0,7
8	1,000	25,75	1,000	0,025	25,8	0,7
9	0,900	27,00	1,111	0,031	24,3	0,7
10	0,800	27,00	1,250	0,039	21,6	0,7
11	0,700	27,00	1,43	0,05	18,9	0,7
12	0,600	27,00	1,67	0,07	16,2	0,7
13	0,500	27,25	2,00	0,10	13,6	0,7
14	0,400	27,50	2,50	0,16	11,0	0,7
15	0,300	28,00	3,33	0,28	8,4	0,7
16	0,200	32,00	5,0	0,6	6,4	0,8
17	0,190	47,50	5,3	0,7	9,0	1,2

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	30,5
Temperatur T [K]	303,7
Fehler T [K]	0,6
R [ $J/(mol \cdot K)$ ]	8,3145
pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	40,5
Fehler pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	1,4
Stoffmenge v [mol]	0,00160
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,00005
Steigung pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	-15,5
Fehler Steig. pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	2,1
B [cm <sup>3</sup> /mol]	-239
Fehler B [cm <sup>3</sup> /mol]	37

### Temperatur 3

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	9,00	0,2500	0,0016	36,0	1,0
2	3,500	10,00	0,2857	0,0020	35,0	0,9

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25

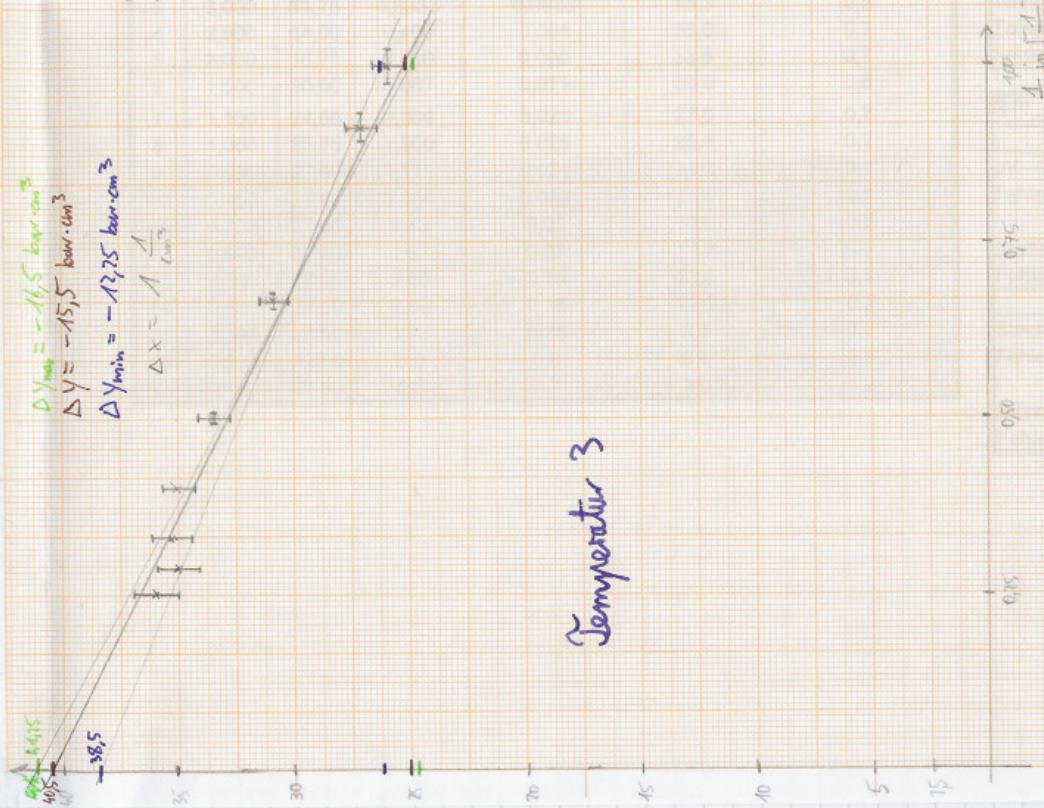
Temperatur T [°C]	30,5
Temperatur T [K]	303,7
[K]	0,6

V	8,3145
---	--------

p [bar cm <sup>3</sup> ]	40,5
pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	1,4
Menge v [mol]	0,00160
Stoffmenge v [mol]	0,00005

Steig. pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	-15,5
Steig. pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	2,1
/mol]	-239
B [cm <sup>3</sup> /mol]	37

Temperatur 3



Temperatur 4

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	9,00	0,2500	0,0016	36,0	1,0
2	3,500	10,50	0,2857	0,0020	36,8	0,9
3	3,000	12,00	0,3333	0,0028	36,0	0,8
4	2,500	14,00	0,400	0,004	35,0	0,7
5	2,000	17,25	0,500	0,006	34,5	0,7
6	1,500	21,25	0,667	0,011	31,9	0,7
7	1,000	27,00	1,000	0,025	27,0	0,7
8	0,900	28,25	1,111	0,031	25,4	0,7
9	0,800	29,50	1,250	0,039	23,6	0,8
10	0,700	30,00	1,43	0,05	21,0	0,8
11	0,600	30,00	1,67	0,07	18,0	0,8
12	0,500	30,25	2,00	0,10	15,1	0,8
13	0,400	30,50	2,50	0,16	12,2	0,8
14	0,300	31,00	3,33	0,28	9,3	0,8
15	0,200	40,00	5,0	0,6	8,0	1,0
16	0,190	50,00	5,3	0,7	9,5	1,3

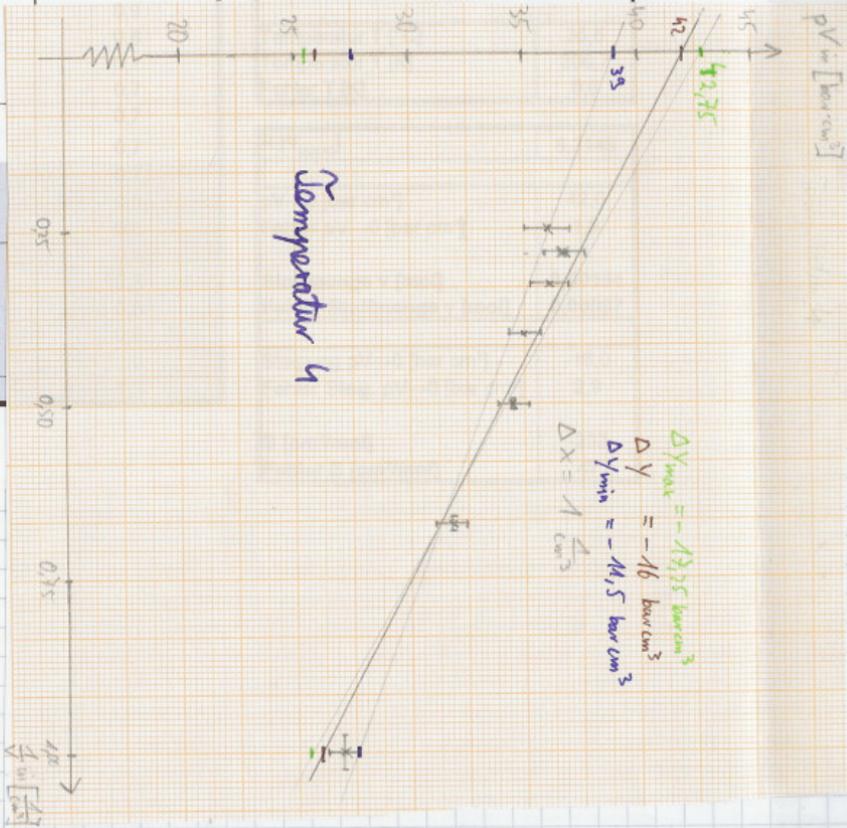
Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	35,5
Temperatur T [K]	308,7
Fehler T [K]	0,6

R [ $J/(mol \cdot K)$ ]	8,3145
pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	42,0
Fehler pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	1,9
Stoffmenge v [mol]	0,00164
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,00007
Steigung pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	-16,0
Fehler Steig. pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	2,9
B [cm <sup>3</sup> /mol]	-233
Fehler B [cm <sup>3</sup> /mol]	47

## Temperatur 4

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	9,00	0,2500	0,0016	36,0	1,0
2	3,500	10,50	0,2857	0,0020	36,8	
3	3,000	12,00	0,3333	0,0028	36,0	
4	2,500	14,00	0,400	0,004	35,0	
5	2,000	17,25	0,500	0,006	34,5	
6	1,500	21,25	0,667	0,011	31,9	
7	1,000	27,00	1,000	0,025	27,0	
8	0,900	28,25	1,111	0,031	25,4	
9	0,800	29,50	1,250	0,039	23,6	
10	0,700	30,00	1,43	0,05	21,0	
11	0,600	30,00	1,67	0,07	18,0	
12	0,500	30,25	2,00	0,10	15,1	
13	0,400	30,50	2,50	0,16	12,2	
14	0,300	31,00	3,33	0,28	9,3	
15	0,200	40,00	5,0	0,6	8,0	
16	0,190	50,00	5,3	0,7	9,5	

Fehler V [cm <sup>3</sup> ] Fehler p [bar]	0,025 0,25
---	---------------



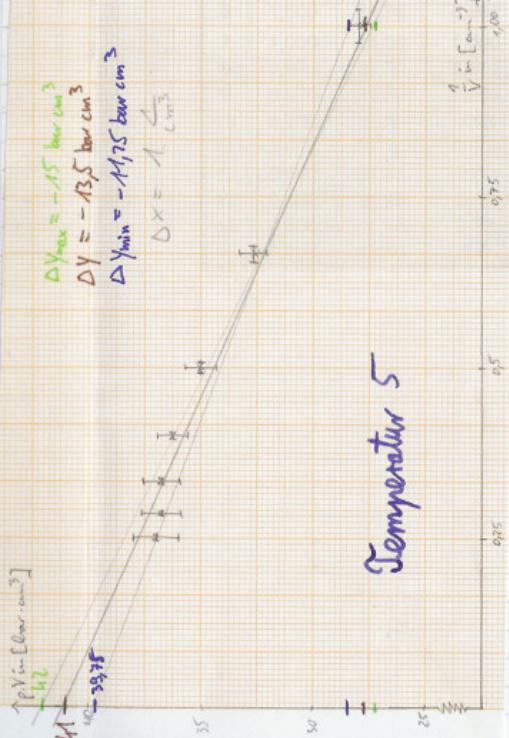
## Temperatur 5

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	9,25	0,2500	0,0016	37,0	1,0
2	3,500	10,50	0,2857	0,0020	36,8	0,9
3	3,000	12,25	0,3333	0,0028	36,8	0,8
4	2,500	14,50	0,400	0,004	36,3	0,7
5	2,000	17,50	0,500	0,006	35,0	0,7
6	1,500	21,75	0,667	0,011	32,6	0,7
7	1,000	28,00	1,000	0,025	28,0	0,7
8	0,900	29,50	1,111	0,031	26,6	0,8
9	0,800	31,00	1,250	0,039	24,8	0,8
10	0,700	32,50	1,43	0,05	22,8	0,8
11	0,600	33,50	1,67	0,07	20,1	0,9
12	0,500	33,75	2,00	0,10	16,9	0,9
13	0,400	34,25	2,50	0,16	13,7	0,9
14	0,300	34,75	3,33	0,28	10,4	0,9
15	0,200	45,50	5,0	0,6	9,1	1,1

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	40,5
Temperatur T [K]	313,7
Fehler T [K]	0,6
R [ $J/(mol \cdot K)$ ]	8,3145
pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	41,0
Fehler pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	1,1
Stoffmenge v [mol]	0,00157
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,00004
Steigung pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	-13,5
Fehler Steig. pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	1,9
B [cm <sup>3</sup> /mol]	-209
Fehler B [cm <sup>3</sup> /mol]	31

### Temperatur 5

Nr.	V [cm³]	p [bar]	1/V [cm⁻³]	Fehler 1/V [cm⁻³]	pV [bar cm³]	Fehler pV [bar cm³]
1	4,000	9,25	0,2500	0,0016	37,0	1,0
2	3,500	10,50	0,2857	0,0020	36,8	0,9
3	3,000	12,25	0,3333	0,0028	36,8	0,8
4	2,500	14,50	0,400	0,004	36,3	0,7
n	2,000	17,50	-	0,006	35,0	0,7
					0,011	32,6
					0,025	28,0
					0,031	26,6
					0,039	24,8
					0,05	22,8
					0,07	20,1
					0,10	16,9
					0,16	13,7
					0,28	10,4
					0,6	9,1



Fehler V [cm³]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	40,5
Temperatur T [K]	313,7
Fehler T [K]	0,6

R [ $J_{(mol K)}$ ]	8,3145
pV → 0 [bar cm³]	41,0
Fehler pV → 0 [bar cm³]	1,1
Stoffmenge v [mol]	0,00157
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,00004
Steigung pV → 0 [bar cm³]	-13,5
Fehler Steig. pV → 0 [bar cm³]	1,9
B [cm³/mol]	-209
Fehler B [cm³/mol]	31

Temperatur 6

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	9,50	0,2500	0,0016	38,0	1,0
2	3,500	10,75	0,2857	0,0020	37,6	0,9
3	3,000	12,50	0,3333	0,0028	37,5	0,8
4	2,500	15,00	0,400	0,004	37,5	0,7
5	2,000	17,75	0,500	0,006	35,5	0,7
6	1,500	22,25	0,6667	0,011	33,4	0,7
7	1,000	28,75	1,000	0,025	28,8	0,8
8	0,900	30,50	1,111	0,031	27,5	0,8
9	0,800	32,00	1,250	0,039	25,6	0,8
10	0,700	33,75	1,43	0,05	23,6	0,9
11	0,600	35,00	1,67	0,07	21,0	0,9
12	0,500	36,00	2,00	0,10	18,0	0,9
13	0,400	36,50	2,50	0,16	14,6	0,9
14	0,300	37,00	3,33	0,28	11,1	0,9
15	0,200	48,50	5,0	0,6	9,7	1,2

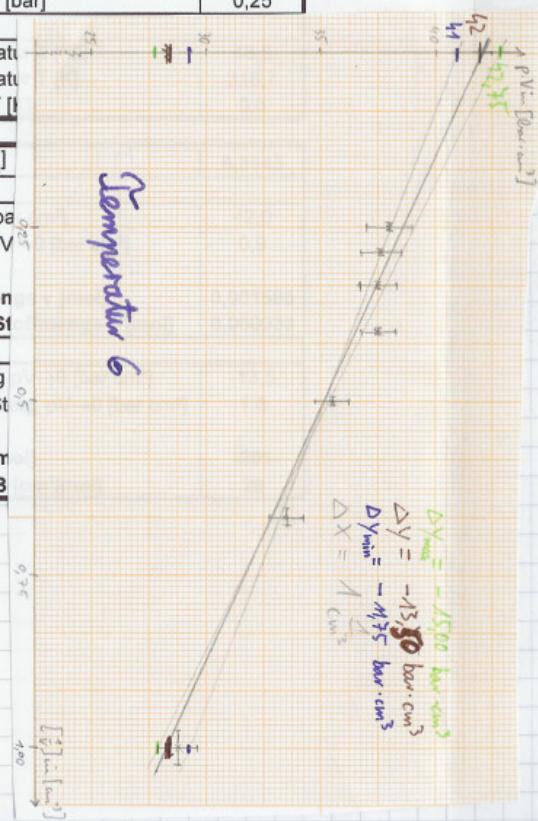
Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	43,5
Temperatur T [K]	316,7
Fehler T [K]	0,6

R [ $J_{(mol\ K)}$ ]	8,3145
pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	42,0
Fehler pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	0,9
Stoffmenge v [mol]	0,001595
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,000033
Steigung pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	-13,5
Fehler Steig. pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	1,6
B [cm <sup>3</sup> /mol]	-201
Fehler B [cm <sup>3</sup> /mol]	26

Temperatur 6

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	9,50	0,2500	0,0016	38,0	1,0
2	3,500	10,75	0,2857	0,0020	37,6	0,9
3	3,000	12,50	0,3333	0,0028	37,5	0,8
4	2,500	15,00	0,400	0,004	37,5	0,7
5	2,000	17,75	0,500	0,006	35,5	0,7
6	1,500	22,25	0,667	0,011	33,4	0,7
7	1,000	28,75	1,000	0,025	28,8	0,8
8	0,900	30,50	1,111	0,031	27,5	0,8
9	0,800	32,00	1,250	0,039	25,6	0,8
10	0,700	33,75	1,43	0,05	23,6	0,9
11	0,600	35,00	1,67	0,07	21,0	0,9
12	0,500	36,00	2,00	0,10	18,0	0,9
13	0,400	36,50	2,50	0,16	14,6	0,9
14	0,300	37,00	3,33	0,28	11,1	0,9
15	0,200	48,50	5,0	0,6	9,7	1,2

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur	44
Temperatur	42
Fehler T [K]	4
R [ $\frac{J}{(mol \cdot K)}$ ]	0,025
pV → 0 [bar]	0,025
Fehler pV	0,025
Stoffmenge	0,5
Fehler St	0,05
Steigung	0,5
Fehler St	0,05
B [cm <sup>3</sup> /m]	0,75
Fehler B	0,075



## Temperatur 7

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	9,75	0,2500	0,0016	39,0	1,0
2	3,500	11,00	0,2857	0,0020	38,5	0,9
3	3,000	12,75	0,3333	0,0028	38,3	0,8
4	2,500	15,00	0,400	0,004	37,5	0,7
5	2,000	17,00	0,500	0,006	34,0	0,7
6	1,500	22,50	0,667	0,011	33,8	0,7
7	1,000	29,50	1,000	0,025	29,5	0,8
8	0,900	31,00	1,111	0,031	27,9	0,8
9	0,800	32,50	1,250	0,039	26,0	0,8
10	0,700	34,50	1,43	0,05	24,2	0,9
11	0,600	36,00	1,67	0,07	21,6	0,9
12	0,500	37,50	2,00	0,10	18,8	0,9
13	0,400	38,00	2,50	0,16	15,2	1,0
14	0,300	38,50	3,33	0,28	11,6	1,0
15	0,200	50,00	5,0	0,6	10,0	1,3

Der Rote Wert weicht sehr stark vom „Erwarteten“ ab (vgl. p-V-Diagramm, S.22, der eine „Ausreißer“) und wurde für das Diagramm nicht verwendet.

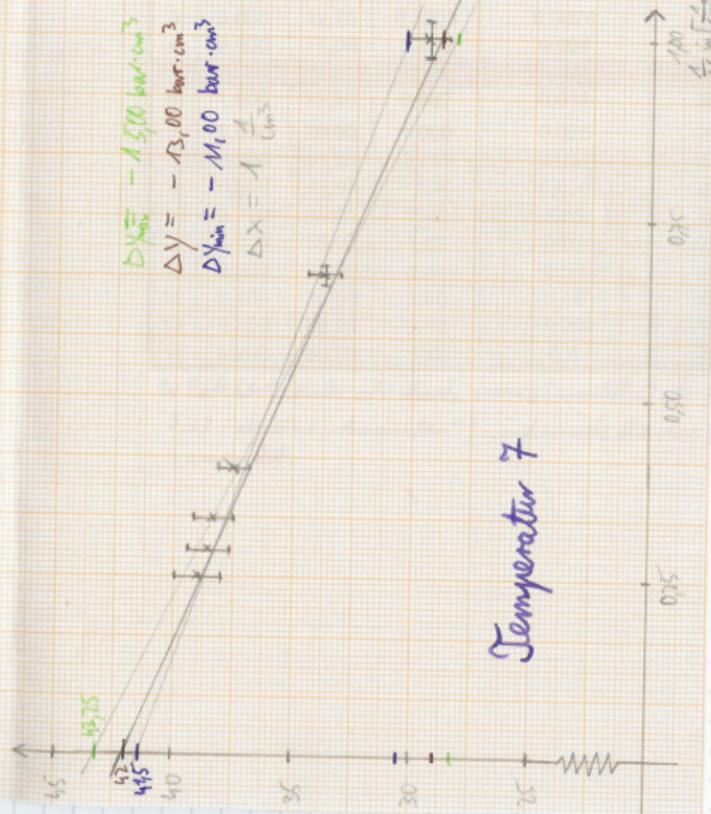
Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	45,5
Temperatur T [K]	318,7
Fehler T [K]	0,6
R [ $J/(mol \cdot K)$ ]	8,3145
pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	42,0
Fehler pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	0,9
Stoffmenge v [mol]	0,001585
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,000033
Steigung pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	-13,0
Fehler Steig. pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	2,0
B [cm <sup>3</sup> /mol]	-195
Fehler B [cm <sup>3</sup> /mol]	31

### Temperatur 7

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	9,75	0,2500	0,0016	39,0	1,0
2	3,998	9,75	0,2501	0,0016	38,9	0,9
3	3,996	9,75	0,2502	0,0016	38,8	0,8
4	3,994	9,75	0,2503	0,0016	38,7	0,7
5	3,992	9,75	0,2504	0,0016	38,6	0,7
6	3,990	9,75	0,2505	0,0016	38,5	0,7
7	3,988	9,75	0,2506	0,0016	38,4	0,7
8	3,986	9,75	0,2507	0,0016	38,3	0,7
9	3,984	9,75	0,2508	0,0016	38,2	0,8
10	3,982	9,75	0,2509	0,0016	38,1	0,8
11	3,980	9,75	0,2510	0,0016	38,0	0,9
12	3,978	9,75	0,2511	0,0016	37,9	0,9
13	3,976	9,75	0,2512	0,0016	37,8	1,0
14	3,974	9,75	0,2513	0,0016	37,7	1,0
15	3,972	9,75	0,2514	0,0016	37,6	1,0
16	3,970	9,75	0,2515	0,0016	37,5	1,0
17	3,968	9,75	0,2516	0,0016	37,4	1,3

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	45,5
Temperatur T [K]	318,7
Fehler T [K]	0,6

R [ $\frac{J}{(mol \cdot K)}$ ]	8,3145
pV → 0 [bar cm <sup>3</sup> ]	42,0
Fehler pV → 0 [bar cm <sup>3</sup> ]	0,9
Stoffmenge v [mol]	0,001585
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,000033
Steigung pV → 0 [bar cm <sup>3</sup> ]	-13,0
Fehler Steig. pV → 0 [bar cm <sup>3</sup> ]	2,0
B [cm <sup>3</sup> /mol]	-195
Fehler B [cm <sup>3</sup> /mol]	31



Temperatur 8

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	10,00	0,2500	0,0016	40,0	1,0
2	3,500	11,25	0,2857	0,0020	39,4	0,9
3	3,000	13,00	0,3333	0,0028	39,0	0,8
4	2,500	15,50	0,400	0,004	38,8	0,7
5	2,000	18,50	0,500	0,006	37,0	0,7
6	1,500	23,00	0,667	0,011	34,5	0,7
7	1,000	30,00	1,000	0,025	30,0	0,8
8	0,900	31,50	1,111	0,031	28,4	0,8
9	0,800	33,50	1,250	0,039	26,8	0,9
10	0,700	35,50	1,43	0,05	24,9	0,9
11	0,600	37,50	1,67	0,07	22,5	0,9
12	0,500	39,00	2,00	0,10	19,5	1,0
13	0,400	40,25	2,50	0,16	16,1	1,0
14	0,300	41,50	3,33	0,28	12,5	1,0
15	0,250	49,50	4,0	0,4	12,4	1,2

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25

Temperatur T [°C]	48,5
Temperatur T [K]	321,7
Fehler T [K]	0,6

R [ $J/(mol \cdot K)$ ]	8,3145

pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	44,0
Fehler pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	1,0

Stoffmenge v [mol]	0,001645
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,000038

Steigung pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	-14,5
Fehler Steig. pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	1,8

B [cm <sup>3</sup> /mol]	-200
Fehler B [cm <sup>3</sup> /mol]	26

## Temperatur 8

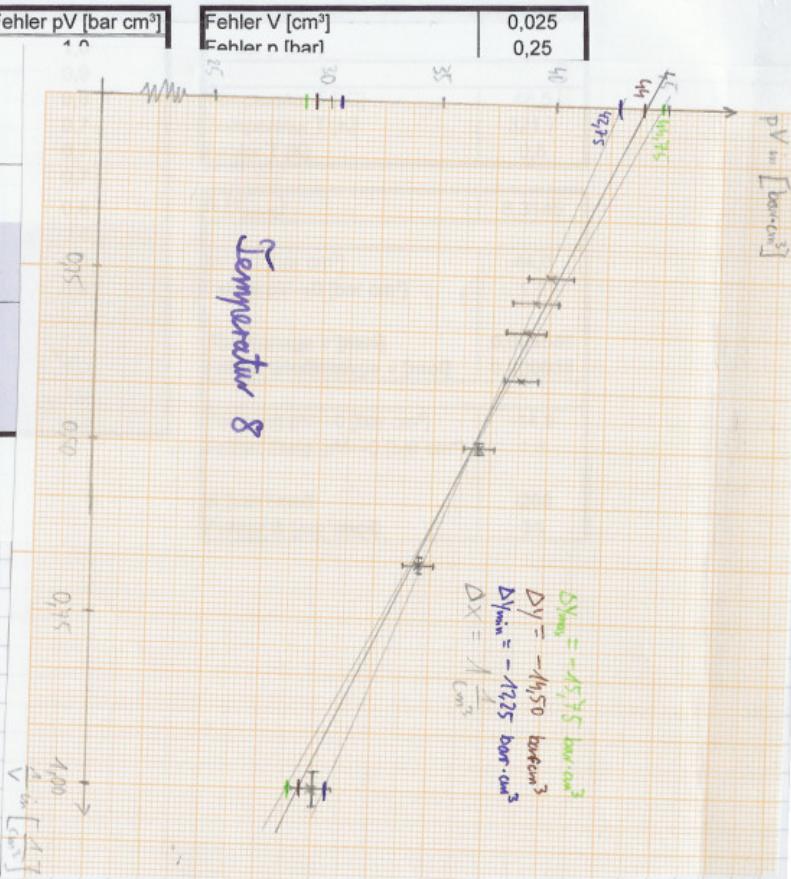
Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	10,00	0,2500	0,0016	40,0	
2	3,500	11,25	0,2857	0,0020	39,4	
3	3,000	13,00	0,3333	0,0028	39,0	
4	2,500	15,50	0,400	0,004	38,8	
5	2,000	18,50	0,500	0,006	37,0	
6	1,500	23,00	0,667	0,011	34,5	
7	1,000	30,00	1,000	0,025	30,0	
8	0,900	31,50	1,111	0,031	28,4	
9	0,800	33,50	1,250	0,039	26,8	
10	0,700	35,50	1,43	0,05	24,9	
11	0,600	37,50	1,67	0,07	22,5	
12	0,500	39,00	2,00	0,10	19,5	
13	0,400	40,25	2,50	0,16	16,1	
14	0,300	41,50	3,33	0,28	12,5	
15	0,250	49,50	4,0	0,4	12,4	

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25

$$\Delta V = 14,75 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V_m = [bar \cdot cm^3]$$

## Temperatur 8



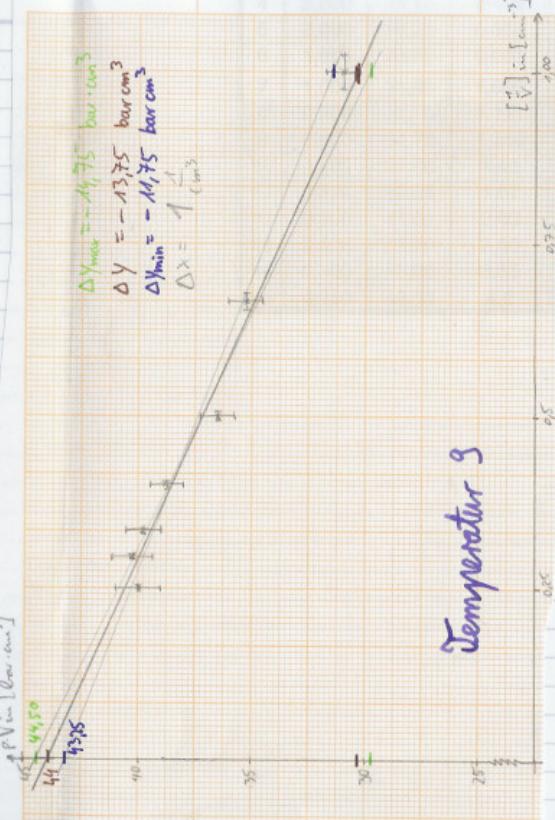
## Temperatur 9

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	10,00	0,2500	0,0016	40,0	1,0
2	3,500	11,50	0,2857	0,0020	40,3	0,9
3	3,000	13,25	0,3333	0,0028	39,8	0,8
4	2,500	15,50	0,400	0,004	38,8	0,7
5	2,000	18,25	0,500	0,006	36,5	0,7
6	1,500	23,50	0,667	0,011	35,3	0,7
7	1,000	31,00	1,000	0,025	31,0	0,8
8	0,900	32,75	1,111	0,031	29,5	0,8
9	0,800	34,75	1,250	0,039	27,8	0,9
10	0,700	37,00	1,43	0,05	25,9	0,9
11	0,600	39,25	1,67	0,07	23,6	1,0
12	0,500	41,50	2,00	0,10	20,8	1,0
13	0,400	43,50	2,50	0,16	17,4	1,1
14	0,300	46,00	3,33	0,28	13,8	1,2
15	0,250	49,50	4,0	0,4	12,4	1,2

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	53,5
Temperatur T [K]	326,7
Fehler T [K]	0,6
R [ $J/(mol \cdot K)$ ]	8,3145
pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	44,0
Fehler pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	0,6
Stoffmenge v [mol]	0,001620
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,000023
Steigung pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	-13,8
Fehler Steig. pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	1,5
B [cm <sup>3</sup> /mol]	-193
Fehler B [cm <sup>3</sup> /mol]	22

### Temperatur 9

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	10,00	0,2500	0,0016	40,0	1,0
2	3,500	11,50	0,2857	0,0020	40,3	0,9
3	3,000	13,25	0,3333	0,0028	39,8	0,8
				0,004	38,8	0,7
				0,006	36,5	0,7
				0,011	35,3	0,7
				0,025	31,0	0,8
				0,031	29,5	0,8
				0,039	27,8	0,9
				0,05	25,9	0,9
				0,07	23,6	1,0
				0,10	20,8	1,0
				0,16	17,4	1,1
				0,28	13,8	1,2
				0,4	12,4	1,2



Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	53,5
Temperatur T [K]	326,7
Fehler T [K]	0,6

R [ $\text{J} / (\text{mol K})$ ]	8,3145
$pV \rightarrow 0$ [bar cm <sup>3</sup> ]	44,0
Fehler $pV \rightarrow 0$ [bar cm <sup>3</sup> ]	0,6
Stoffmenge v [mol]	0,001620
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,000023
Steigung $pV \rightarrow 0$ [bar cm <sup>3</sup> /K]	-13,8
Fehler Steig. $pV \rightarrow 0$ [bar cm <sup>3</sup> /K]	1,5
B [cm <sup>3</sup> /mol]	-193
Fehler B [cm <sup>3</sup> /mol]	22

Temperatur 10

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	10,25	0,2500	0,0016	41,0	1,0
2	3,500	11,50	0,2857	0,0020	40,3	0,9
3	3,000	13,50	0,3333	0,0028	40,5	0,8
4	2,500	16,00	0,400	0,004	40,0	0,7
5	2,000	19,25	0,500	0,006	38,5	0,7
6	1,500	24,00	0,667	0,011	36,0	0,7
7	1,000	32,25	1,000	0,025	32,3	0,8
8	0,900	34,25	1,111	0,031	30,8	0,9
9	0,800	36,50	1,250	0,039	29,2	0,9
10	0,700	39,25	1,43	0,05	27,5	1,0
11	0,600	41,50	1,67	0,07	24,9	1,0
12	0,500	44,00	2,00	0,10	22,0	1,1
13	0,400	47,00	2,50	0,16	18,8	1,2
14	0,300	51,00	3,33	0,28	15,3	1,3

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25
Temperatur T [°C]	58,5
Temperatur T [K]	331,7
Fehler T [K]	0,6

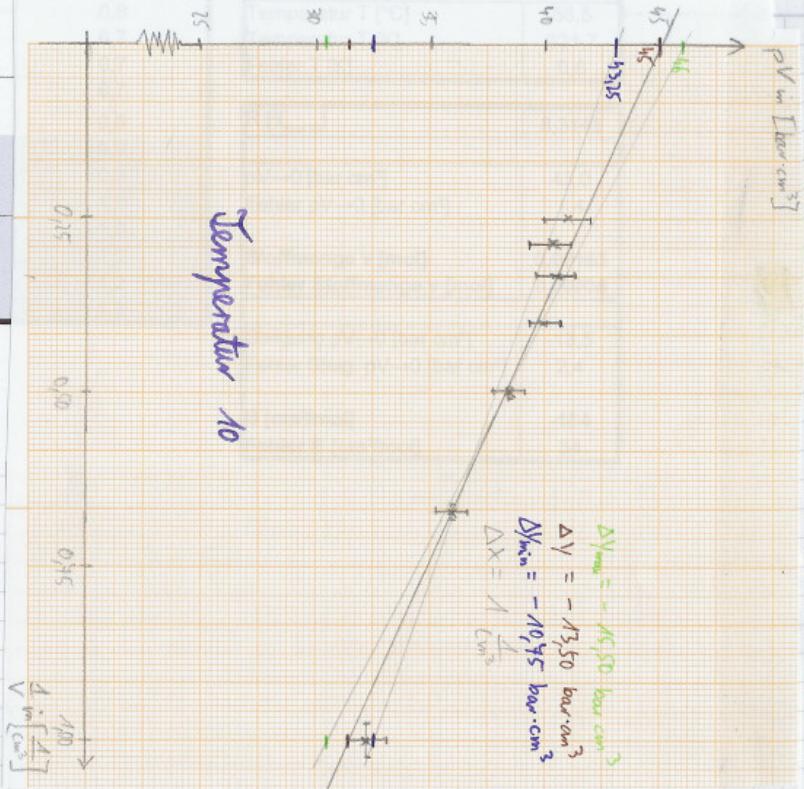
R [J/(mol K)]	8,3145
pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	45,0
Fehler pV→0 [bar cm <sup>3</sup> ]	1,4
Stoffmenge v [mol]	0,00163
Fehler Stoffmenge v [mol]	0,00005

Steigung pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	-13,5
Fehler Steig. pV→0 [bar cm <sup>6</sup> ]	2,4
B [cm <sup>3</sup> /mol]	-184
Fehler B [cm <sup>3</sup> /mol]	34

Temperatur 10

Nr.	V [cm <sup>3</sup> ]	p [bar]	1/V [cm <sup>-3</sup> ]	Fehler 1/V [cm <sup>-3</sup> ]	pV [bar cm <sup>3</sup> ]	Fehler pV [bar cm <sup>3</sup> ]
1	4,000	10,25	0,2500	0,0016	41,0	1,0
2	3,500	11,50	0,2857	0,0020	40,3	0,9
3	3,000	13,50	0,3333	0,0028	40,5	
4	2,500	16,00	0,400	0,004	40,0	
5	2,000	19,25	0,500	0,006	38,5	
6	1,500	24,00	0,667	0,011	36,0	
7	1,000	32,25	1,000	0,025	32,3	
8	0,900	34,25	1,111	0,031	30,8	
9	0,800	36,50	1,250	0,039	29,2	
10	0,700	39,25	1,43	0,05	27,5	
11	0,600	41,50	1,67	0,07	24,9	
12	0,500	44,00	2,00	0,10	22,0	
13	0,400	47,00	2,50	0,16	18,8	
14	0,300	51,00	3,33	0,28	15,3	

Fehler V [cm <sup>3</sup> ]	0,025
Fehler p [bar]	0,25



### 7.2.5 Berechnung der Stoffmenge $\Sigma$ aus den $\Sigma_i$

Es werden folgende Stoffmengen berechnet (siehe vorherige Tabelle):

$$\Sigma_1 = (1,59 \pm 0,06) \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\Sigma_2 = (1,59 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\Sigma_3 = (1,60 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\Sigma_4 = (1,64 \pm 0,07) \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\Sigma_5 = (1,57 \pm 0,09) \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\Sigma_6 = (1,595 \pm 0,033) \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\Sigma_7 = (1,585 \pm 0,033) \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\Sigma_8 = (1,645 \pm 0,038) \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\Sigma_9 = (1,620 \pm 0,023) \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

$$\Sigma_{10} = (1,63 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

Um das Endergebnis für die Stoffmenge zu erhalten, wird der Mittelwert der  $\Sigma_i$  gebildet:

$$\bar{\Sigma} = \frac{1}{10} \cdot \sum_{i=1}^{10} \Sigma_i = 0,001607 \text{ mol}$$

Für den Fehler von  $\Sigma$  gilt:

$$\sigma_\Sigma = \frac{1}{10} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{10} \sigma_{\Sigma_i}^2} = 0,000015 \text{ mol}$$

$$\Rightarrow \boxed{\Sigma = \bar{\Sigma} \pm \sigma_\Sigma = (1,607 \pm 0,015) \cdot 10^{-3} \text{ mol}} \quad (\text{Stoffmenge am SF}_6) \quad \checkmark$$

Masse der Stoffmenge: Die molaren Massen  $M$  werden „Physikalische Formeln und Tabellen“ (Hanser/Hanser, J. Lindauer Verlag, 8. Auflage, S. 91)

entnommen:  $M(S) = 32,06 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ ,  $M(F) = 18,988 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$  (Annahme: fehlerfrei)

$$\Rightarrow m = \Sigma \cdot (M(S) + 6 \cdot M(F)) = 0,234699 \text{ g}$$

$$\text{Fehler: } \sigma_m = (M(S) + 6 \cdot M(F)) \cdot \sigma_\Sigma = 2,19 \cdot 10^{-3} \text{ g}$$

$$\Rightarrow \boxed{m = (234,7 \pm 2,2) \text{ mg}} \quad (\text{Masse am SF}_6)$$

Gewichtlich stimmen die Werte aber v. in etwa im Inhalt der Fehlergrenzen überein, wie erwartet, da ein geschlossenes System vorliegt.  
Auch die Größenordnung der Masse „nicht realistisch“ aus. Insbes.  
stimmt auch das auf S. berechnete kritische Volumen zumindest  
größenordnungsmäßig mit dem abgeschätzten von S. 24 überein.

### 7.2.6 Diagramm des Virialkoeff. B(T)

Es werden folgende Virialkoeff. berechnet (nicht vorliegende Tabellen):

Nr.	Temp [K]	B [ $\frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$ ]	$s_B$ [ $\frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$ ]	
1	289,7	-290	40	Fehler der Temperatur:
2	298,7	-247	32	$s_T = 0,6 \text{ K}$ (vgl. S. 24)
3	303,7	-239	37	
4	308,7	-233	47	
5	313,7	-209	31	
6	316,7	-201	26	
7	318,7	-195	31	
8	321,7	-200	26	
9	326,7	-193	22	
10	331,7	-184	34	

Literaturwerte nach Tigray S. RG-5:

Temp [K]	B [ $\frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$ ]
293,15	-294
303,15	-275
313,15	-257
323,15	-235
333,15	-223

- Zunächst fällt auf, dass  $B(T)$  tendenziell steigt, was mit den Literaturwerten übereinstimmt. D.h.  $B(T)$  nähert sich für große  $T$  ab 0 an, womit  $\rho = \frac{RT}{V} \cdot \left(1 + \frac{B}{V} \cdot B(T)\right)$  (Tigray S. RG-2) in  $\rho \approx \frac{RT}{V}$ , also dem idealen Gasgesetz übergeht, was zu erwarten war, da diese lehrt, dass realen Gasen bei hohen Temperaturen näherungsweise richtig hergeholt.

- (Unterlinie) sind die errechneten Fehler von B vergleichsweise groß, da der Fehler der Steigung  $s_B$  relativ groß ist: z.B. für die Temperatur 1 ist 3 mm anders in der Formel  $s_B = \sqrt{1.3 \text{ mm ad} + 2. \text{ Lm.} + 3. \text{ Lmm.}}$  (siehe S. 28) wie folgt:

$$1. \text{ Summand} \approx 117.2 \left( \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}} \right)^2$$

$$2. \text{ Summand} \approx 460 \left( \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}} \right)^2$$

$$3. \text{ Summand} \approx 0.3 \left( \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}} \right)^2$$

Der 1. Summand beschreibt daher den Einfluss des Fehlers  $s_B$  der Steigung der  $pV - \frac{1}{V}$ -Diagramme.

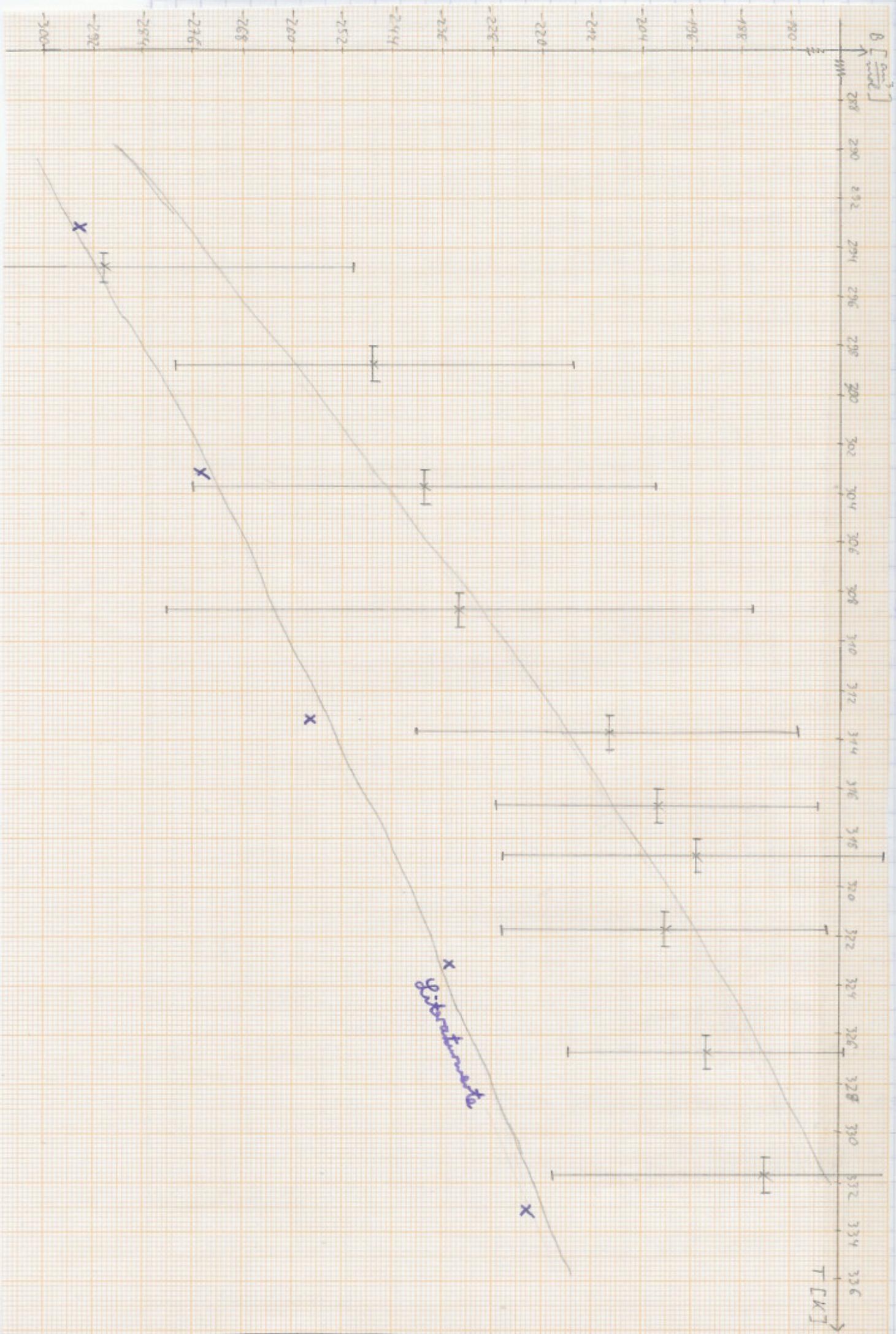
Um ihm zu dienen könnte man z.B. eine (rechnerische) lineare Regression durchführen, so dass der Fehler nicht mehr abgeschätzt werden müsste (und die eigl. Steigung). Oder es müssen die Messmethoden von p und V verfeinert werden (längere Wartesitz, feine Graden,...).

- & Trotz der großen Fehler von B & weichen die Literaturwerte von B signifikant von unseren ab. Über die Steigung der beiden  $B(T)$ -Kurven ist hingegen nur schwer eine Aussage zu treffen, da eben die Fehler so groß sind, dass man  $B(T)$  auch "blätte", „parallel“ hätte einzeichnen können.

Mögliche Fehlerquellen:

- evtl. zu kurze Wartesitz nach Durchänderung ✓
- zu große Graden, wodurch die „wahren“ Werte sehr oder weniger stark von den abgesetzten abweichen. Dies ist v.a. wegen folgenden ein Problem:
- Der Wert von B ist sehr empfindlich davon abhängig, wie die Gerade der  $pV - \frac{1}{V}$ -Diagramme gelegt wird, d.h. er ist auch relativ empfindlich gegenüber den Messwerten p und V.  $\Rightarrow$  Problem: graphische Bestimmung von v
- Die Anschwillezäule erschwert die genaue Volumenmessung, da stets, aufgrund der großen Oberflächenspannung, eine „Völlung“ vorhanden war.

- es wurde eine Gerade als zum Ausgleich verwendet, jedoch bildet die Funktion  $(\rho V) \left(\frac{1}{V}\right)$  nur für kleine  $\frac{1}{V}$  wirklich eine Gerade



## 7.3 Kritischer Exponent $\gamma$

### 7.3.1 Berechnung von $V_c$

Nach S. 5 hängt die Stoffmenge  $\sigma$  vom kritischen Volumen  $V_c$

wie folgt ab:  $V_c = 3\tilde{b} \cdot \sigma = V_c^{\text{mol}} \cdot \sigma$  mit  $V_c^{\text{mol}} = 3\tilde{b}$  (molares, kritisches Volumen)

Nach Skript S. RG-5 gilt:  $V_c^{\text{mol}} = 197,4 \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}$

→ mit  $\sigma$  von S. 39 folgt (d.h.  $\sigma = (1,607 \pm 0,015) \cdot 10^{-3} \text{ mol}$ ):

$$V_c = 0,31722 \text{ cm}^3$$

Fehler ( $V_c^{\text{mol}}$  wird als fehlerfrei angenommen):

$$\gamma_{V_c} = V_c^{\text{mol}} \cdot \gamma_{\sigma} \approx 2,961 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3$$

$$\Rightarrow V_c = (317,2 \pm 3,0) \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3 = (317,2 \pm 3,0) \text{ mm}^3$$

Auf S. 24 wurde  $V_c$  zu  $V_c = (0,50 \pm 0,08) \text{ cm}^3$  abgeschätzt. Die Abweichung ist also signifikant, jedoch stimmt zumindest die Größenordnung.

Als Fehlerquelle lassen sich wieder die selben wie unter 7.2.6 (S. 91f) angeben. Außerdem konnte  $V_c$  nur sehr schwer aus dem p-V-Diagramm abgeschätzt werden.

### 7.3.2 Bestimmung von $\gamma$

- Nach Skript S. RG-Z gilt:  $\frac{s_{\text{B}} - s_g}{s_c} \approx \left( \frac{T_c - T}{T_c} \right)^\gamma$  nahe des krit. Punkts.

$$\frac{s_{\text{B}} - s_g}{s_c} = R \quad \frac{T_c - T}{T_c} = \tau^\gamma$$

D.h. wird  $R^3$  gegen  $\tau$  aufgetragen und ist  $\gamma = \frac{1}{3}$ , so sollte sich eine Gerade ergeben.

- Nach S. 8 gilt:  $R = \frac{s_{\text{B}} - s_g}{s_c} = V_c \cdot \left( \frac{1}{V_{\text{B}}} - \frac{1}{V_g} \right)$

$\Rightarrow$  es wird  $\left[ V_c \cdot \left( \frac{1}{V_{\text{B}}} - \frac{1}{V_g} \right) \right]^3$  gegen  $\frac{T_c - T}{T_c}$  aufgetragen, und zwar in der Nähe des kritischen Punkts.

- Fehler von  $R^3 = \left[ V_c \cdot \left( \frac{1}{V_{\text{B}}} - \frac{1}{V_g} \right) \right]^3$ :

$$\begin{aligned} \sigma_{R^3}^2 &= \left( \frac{\partial R^3}{\partial V_c} \cdot \sigma_{V_c} \right)^2 + \left( \frac{\partial R^3}{\partial V_{\text{B}}} \cdot \sigma_{V_{\text{B}}} \right)^2 + \left( \frac{\partial R^3}{\partial V_g} \cdot \sigma_{V_g} \right)^2 = \\ &= \left( 3 \cdot \left[ V_c \cdot \left( \frac{1}{V_{\text{B}}} - \frac{1}{V_g} \right) \right]^2 \cdot \left( \frac{1}{V_{\text{B}}} - \frac{1}{V_g} \right) \cdot \sigma_{V_c} \right)^2 + \\ &\quad + \left( 3 \cdot \left[ V_c \cdot \left( \frac{1}{V_{\text{B}}} - \frac{1}{V_g} \right) \right]^2 \cdot \left( -\frac{V_c}{V_{\text{B}}^2} \right) \cdot \sigma_{V_{\text{B}}} \right)^2 + \\ &\quad + \left( 3 \cdot \left[ V_c \cdot \left( \frac{1}{V_{\text{B}}} - \frac{1}{V_g} \right) \right]^2 \cdot \left( \frac{V_c}{V_g^2} \right) \cdot \sigma_{V_g} \right)^2 = \\ &= 9 \cdot \left[ V_c \cdot \left( \frac{1}{V_{\text{B}}} - \frac{1}{V_g} \right) \right]^4 \cdot \left[ \left( \frac{1}{V_{\text{B}}} - \frac{1}{V_g} \right) \cdot \sigma_{V_c} \right]^2 + \left( \frac{V_c}{V_{\text{B}}^2} \cdot \sigma_{V_{\text{B}}} \right)^2 + \left( \frac{V_c}{V_g^2} \cdot \sigma_{V_g} \right)^2 \end{aligned}$$

- Fehler von  $\tau = \frac{T_c - T}{T_c}$ :

$$\begin{aligned} \sigma_\tau^2 &= \left( \frac{\partial \tau}{\partial T_c} \cdot \sigma_{T_c} \right)^2 + \left( \frac{\partial \tau}{\partial T} \cdot \sigma_T \right)^2 = \\ &= \left( \frac{T_c - (T_c - T)}{T_c^2} \cdot \sigma_{T_c} \right)^2 + \left( -\frac{1}{T_c} \cdot \sigma_T \right)^2 = \\ &= \left( \frac{T}{T_c^2} \cdot \sigma_{T_c} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_T}{T_c} \right)^2 \end{aligned}$$

- Werte, die für alle Temperaturen konstant sind:

$$\left. \begin{array}{l} V_c = 313,2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3 \\ n_{V_0} = 3,0 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3 \end{array} \right\} \text{S. 43}$$

$$\left. \begin{array}{l} T_c = 315,2 \text{ K} \\ n_{T_0} = 0,6 \text{ K} \end{array} \right\} \text{S. 25}$$

$$n_T = 0,6 \text{ K} \quad (\text{S. 24})$$

$$n_{V_0} = n_{V_g} = 0,025 \text{ cm}^3 \quad (\text{S. 9})$$

- Für  $T = T_c$  ist offensichtlich  $\tau = 0$  und per Definition  $V_{gg} = V_g$ , d.h.

auch  $R^3 = 0$ . D.h. ein Punkt der artl. Geraden ist der Nullpunkt.

- Als 2. Wert wird die Isotherme der Temp. 5 herangezogen, welche „dicht“ unter der Sait. Temperatur liegt. Mit Hilfe des Isotermen-Diagramms von S. 22 wird abgeschätzt:

$$V_{gg} = 0,450 \text{ cm}^3 \quad \text{und} \quad V_g = 0,625 \text{ cm}^3.$$

Hierbei ist  $T = 313,7 \text{ K}$ .

- Als 3. Wert wird die Isotherme der Temp. 4 verwendet. Aus dem Diagramm S. 22 wird abgelesen:

$$V_{gg} = 0,375 \text{ cm}^3 \quad \text{und} \quad V_g = 0,500 \text{ cm}^3$$

mit  $T = 308,7 \text{ K}$ .

- Die Werte der Temp. 3 wären:

$$V_{gg} = 0,300 \text{ cm}^3 \quad \text{und} \quad V_g = 0,400 \text{ cm}^3 \quad \text{mit } T = 303,7 \text{ K}.$$

Wie in der Tafelstabelle zu erkennen liegt dieser Wert jedoch weit von den 3 anderen Werten entfernt und nicht auf der Geraden, d.h. er befindet sich nicht mehr in der Nähe des Sait. Punktes.

- Werte überhalb der Sait. Temperatur sind per Definition von  $V_{gg}$  und  $V_g$  sinnlos.

⇒ b, können nur diese 3 Punkte verwendet werden.

$R^3 \text{ in } [10^{-4}]$



T [K]	$V_n$ [ $\text{cm}^3$ ]	$V_g$ [ $\text{cm}^3$ ]	$R^3$	Fehler $R^3$	$\tau$	Fehler $\tau$
313,7	0,450	0,625	0,008	0,005	0,0048	0,0027
308,7	0,325	0,500	0,040	0,029	0,0206	0,0027
303,7	0,300	0,900	0,35	0,13	0,0365	0,0026

Fehler T [K]	0,6
Fehler $V_n$ und $V_g$ [ $\text{cm}^3$ ]	0,025
$V_c$ in [ $\text{cm}^3$ ]	0,32
Fehler $V_c$ in [ $\text{cm}^3$ ]	0,0030
$T_c$ in [K]	315,2

nicht verwendet

Man erkennt, dass sich innerhalb des Fehlervalters eine Gruppe einzeichnen lässt. D.h. es liegt zumindest beim Widerstand zur Annahme  $\rho = \frac{1}{3}$  vor; jedoch ist diese Aussage relativ schwach, da nur 3 Läufe verwendet werden konnten und die Fehler sehr groß sind.

Zwei Punkt-Pfeile kann ich noch eine Stelle einzeichnen!

### 7.3.3 Aussage über $(\beta_{\text{fl}} - \beta_g)$ bei $T = T_c$

Wie bereits auf 5.45 geschildert, muss für  $T = T_c$  gelten:

$$R=0 = \frac{\beta_{\text{fl}} - \beta_g}{\beta_c} \Leftrightarrow \beta_{\text{fl}} = \beta_g$$

D.h. die Dichte der gasförmigen und der flüssigen Phase berichten ab dem kritischen Punkt diese selbe Dichte. Damit wird auch verständlich, warum ab diesem ein Stoff nicht mehr verflüssigt werden kann, weil eben die hypothetische Dichte der fl. Phase identisch zu der Dichte der Gasphase ist, d.h. von dieser nicht mehr zu unterscheiden ist.