

# Absorption

Daniel Bomze W05

Paul Gauss W12

Paul KautnyW20

09. 11. 2009

---

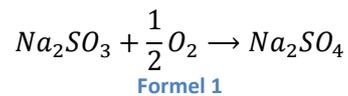
## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Aufgabenstellung .....</b>	<b>2</b>
<b>2. Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>2</b>
2.1. Absorption.....	2
2.2. Stoffübergang, Stoffdurchgang und Zweifilmmethode.....	3
2.3. Physikalische Absorption.....	3
2.4. Chemische Absorption .....	4
<b>3. Versuchsdurchführung.....</b>	<b>4</b>
<b>4. Auswertung.....</b>	<b>6</b>
4.1. Berechnung der Molenstromdichte <b>nO2</b> .....	6
4.2. Berechnung des Molenstroms <b>NO2</b> .....	8
4.3. Austauschfläche und Benetzungsgrad .....	9
4.4. Gasdurchsatz, Volumendurchsatz, Gasbelastung und Flüssigkeitsbelastung .....	10
<b>5. Diskussion der Ergebnisse &amp; Fehlerabschätzung.....</b>	<b>11</b>
5.1. Fehlerquellen bei der Messung.....	11
5.2. Vereinfachungen .....	11
5.3. pH-Wert.....	12
<b>6. Anhang .....</b>	<b>12</b>
6.1. Messergebnisse .....	12
6.2. Abbildungsverzeichnis.....	13
6.3. Tabellenverzeichnis.....	14
6.4. Formelverzeichnis .....	14
6.5. Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Symbole .....	15
<b>7. Referenzen.....</b>	<b>15</b>

## I. AUFGABENSTELLUNG

Es sollen bei bekannter Kinetik die Molenstromdichte und der Molenstrom für die Absorption von Sauerstoff in einer bepackten Säule ermittelt werden. Anschließend müssen die Gesamtphasengrenzfläche, die spezifische Phasengrenzfläche und der Benetzungsgrad errechnet werden.

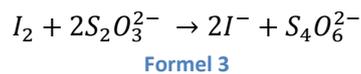
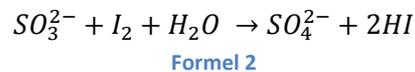
Als Reaktion ist die Oxidation von Sulfit zu Sulfat mit Hilfe eines Kobalt Katalysators vorgegeben:



Dabei müssen folgende Voraussetzungen gelten:

- Einheitliche Konzentration in der Gasphase
- Unabhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Konzentration der Reaktionspartner
- Rasche Reaktion, die nur in der Flüssigphase abläuft

Die Abnahme der Sulfitkonzentration in der Waschflüssigkeit kann titrimetrisch mit Hilfe von Iod bestimmt werden, da es zuerst das Sulfit oxidiert und danach das restliche Iod mit Natriumthiosulfat titriert werden kann. Das Iod wird dabei ebenfalls oxidiert, was zu einer Entfärbung der Lösung führt.



## 2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN

### 2.1. ABSORPTION

Die Absorption ist jenes Trennverfahren, bei dem ein Absorptiv (Gas) von einer Flüssigkeit aufgenommen wird. Man unterscheidet grundsätzlich zwischen physikalischer und chemischer Absorption. Bei der physikalischen Absorption wird der Stoff rein physikalisch in dem flüssigen Medium gelöst und bleibt dabei unverändert. Die chemische Absorption hingegen ist eine Reaktion mit der Waschflüssigkeit.

## 2.2. STOFFÜBERGANG, STOFFDURCHGANG UND ZWEIFILMMETHODE

Man geht davon aus, dass der Stofftransport von der einen in die andere Phase nur durch Diffusion zwischen zwei an der Phasengrenze aneinander liegenden, laminaren Grenzschichten erfolgt. In den Phasen erfolgt der Transport sehr schnell durch turbulente Konvektion und man kann von einer einheitlichen Konzentration ausgehen. Die Grenzfläche selbst stellt keinen Transportwiderstand dar. An ihr stellt sich ein Gleichgewicht ein.

Der Übergang wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\dot{N}_i = \beta_i \times A \times (c_{G,i} - c_{K,i}) = \beta_i \times A \times \Delta c_i$$

Formel 4

In den laminaren Grenzschichten gilt:

$$\dot{N}_i = D_i \times A \frac{\Delta c_i}{\delta} = \beta_i \times A \times \Delta c_i$$

Formel 5

Daraus ergibt sich als Stofftransportkoeffizient:

$$\beta_i = \frac{D_i}{\delta}$$

Formel 6

## 2.3. PHYSIKALISCHE ABSORPTION

Wenn sich ein Gas physikalisch in einer Flüssigkeit löst, ist der Partialdruck einer Komponente  $p_i$  dem Aktivitätskoeffizienten  $\gamma_i$ , dem Sättigungsdruck  $p_{0,i}$  und dem Molenanteil  $x_i$  proportional.

$$p_i = \gamma_i \times x_i \times p_{0,i}$$

Formel 7

Für kleine Konzentrationen und schlechte Löslichkeit gilt das Henry'sche Gesetz für verdünnte Lösungen.

$$p_i = H_i \times x_i$$

Formel 8

$$K_i = \frac{\gamma_i}{x_i} = \frac{H_i}{p}$$

Formel 9

Verhält sich die flüssige Phase, gemäß dem Raoult'schen Gesetz, ideal ist der Aktivitätskoeffizient  $\gamma_i$  gleich eins. Die beiden Gesetze sind als Grenzgesetze zu betrachten, wie Abbildung 1 veranschaulicht.

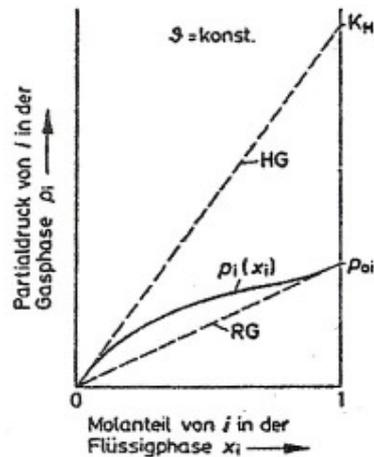


Abbildung 1 Vergleich des Henry- und des Raoult'schen Gesetzes mit dem realen Partialdrücken in Abhängigkeit des Molanteils

#### 2.4. CHEMISCHE ABSORPTION

Bei chemisch wirkenden Waschmitteln reagiert ein Absorptiv A mit z Molen eines Waschmittels B zu s Mol eines Produkts C. Die Kinetik der Reaktion ist durch die Geschwindigkeitskonstanten  $k_f$  und  $k_{ri}$  bestimmt. Wobei  $k_f$  für die Hinreaktion und  $k_{ri}$  für die Rückreaktion steht.

Das chemische Gleichgewicht lautet dann:

$$K_R = \frac{c_c^s}{c_a \times c_b^z}$$

Formel 10

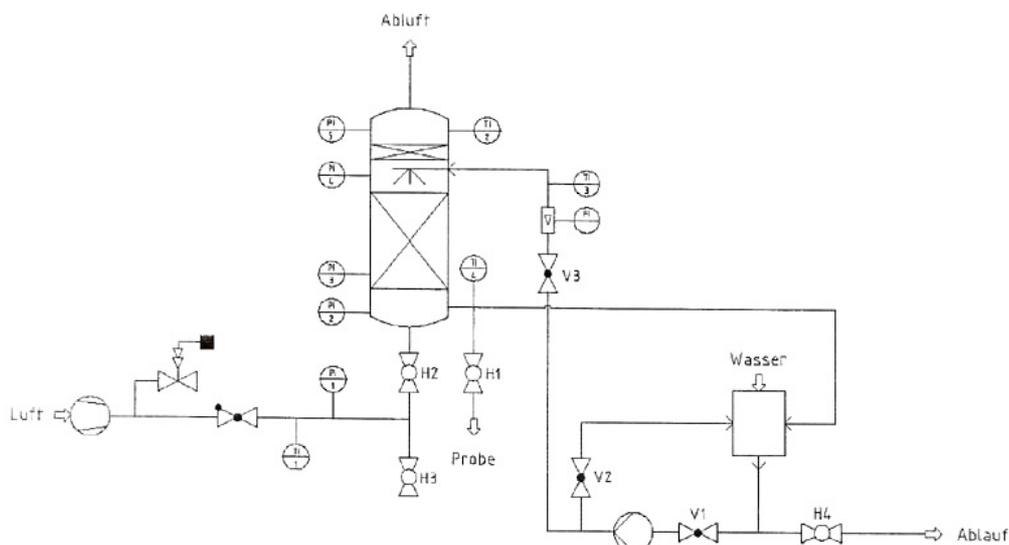
Ist die Hinreaktion sehr dominant und nimmt die Gleichgewichtskonstante sehr große Werte an, so wird die maximale Beladung des Waschmittels erreicht, aber die Regeneration erschwert.

### 3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Es wurde eine Plexiglaszylinder mit einer Nennweite von 188mm und einer Schütthöhe von 950mm verwendet. Die Füllung bestand aus Polypropylen -Pall® Ringen

Werkstoff	Polypropylen
Durchmesser	18 mm
Lückengrad	87,7%
Spez. Oberfläche	310 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Spez. Gewicht	109,8 kg/m <sup>3</sup>

Tabelle 1 Stoffeigenschaften der Pall-Ring Füllung



**Abbildung 2** Fließdiagramm der Versuchsanlage

Als erstes wurde die Waschlösung vorbereitet. Hierfür wurde mit 20 L Wasser eine ca. 5%ige  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  Lösung hergestellt und mit  $\text{H}_2\text{SO}_4$  auf einen pH von 7,5 eingestellt. Nach Überprüfen der Konzentration durch Titration wurde die Absorptionslösung in die Anlage überführt.

Bei der Konzentrationsbestimmung wurden 2ml Probe mit 20 ml 0,1 N Iodlösung gegen 0,1 N Natriumthiosulfat titriert. Der Verbrauch von Thiosulfat vor dem Einbringen der Lösung ins System betrug 4 ml und entsprach einer Konzentration von 0,4 Mol/L (8 Mol/20L).

Nachdem erst nur die Pumpe in Betrieb genommen worden war, wurde nach rund 5 Min eine Probe gezogen und diese einer weiteren Konzentrationsbestimmung unterzogen, da sich in den Totvolumina der Anlage noch Waschwasser befand welches die tatsächliche Konzentration verringerte. Es stellte sich ein Verbrauch von 7,2 ml heraus. Das entspricht einer Konzentration von 0,32 Mol/L. Umgerechnet bedeutet das einen Volumenzuwachs von 5l auf 25l. Anschließend wurden 20 ml Kobaltkatalysator in den Vorratsbehälter der Anlage zugegeben und gleichzeitig das Gebläse in Betrieb genommen. Die zugegebene Menge Katalysator entspricht einer Konzentration von  $8,9 \cdot 10^{-4}$  Mol/L.

Nun wurde, eine Stunde lang, alle 5 Min eine Probe gezogen und per Titration analysiert. Zusätzlich wurden die Temperaturen und Druckwerte sowie der pH-Wert gemessen. Der pH-Wert blieb dabei in etwa bei 7,5. Ein genaues Bestimmen mit dem pH-Papier war jedoch sehr schwierig.

Nach Ende der Messserie wurde die Anlage entleert und zwei Mal mit rund 20l Wasser gespült. Anschließend wurde die Anlage entleert.

## 4. AUSWERTUNG

### 4.1. BERECHNUNG DER MOLENSTROMDICHTE $\dot{n}_{O_2}$

Die Molenstromdichte errechnet sich nach Formel 9:

$$\dot{n}_{O_2} = \beta \times c_{O_2}$$

Formel 11

Mit

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \times k_2 \times c_{O_2} \times D_{O_2}}$$

Formel 12

Und

$$c_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{R \times T \times K}$$

Formel 13

Unter Berücksichtigung des Druckverlustes in der Kolonne, errechnet sich nach dem Dalton-Gesetz der Partialdruck des Sauerstoffs.

$$p_i = y_i \times p_{ges}$$

Formel 14

T [°C]	K [ ]	D <sub>O<sub>2</sub></sub> [10E-9 m <sup>2</sup> /s]	c <sub>Co</sub> [kmol/m <sup>3</sup> ]	pH = 7,5	pH = 8,0	pH = 8,5
				k <sub>2</sub> $\left[\frac{m^3}{kmol \cdot s}\right]$		
20	65	1,6	3E-5	9,72E4	2,33E5	6,09E5
			1E-4	4,35E5	8,62E5	2,15E6
			2E-4	9,65E5	1,71E6	4,65E6
30	69	2,1	3E-5	3,34E5	7,70E5	1,21E6
			1E-4	1,15E6	2,49E6	4,43E6
			2E-4	2,51E6	4,64E6	9,02E6

Tabelle 2 Daten zur Berechnung der Molenstromdichte

Die Werte für K und D<sub>O<sub>2</sub></sub> wurden durch lineare Interpolation errechnet. k<sub>2</sub> hängt von der Konzentration des Katalysators linear ab. Die entsprechenden Werte wurden wiederum für pH 7,5 linear interpoliert. Man erhält für c<sub>Co</sub>=8,9\*10<sup>-4</sup>mol/L und für T=20° C und ein k<sub>2</sub> von 391580  $\left[\frac{m^3}{kmol \cdot s}\right]$  und für T=25 ein k<sub>2</sub> von 1060956  $\left[\frac{m^3}{kmol \cdot s}\right]$ . Der Zusammenhang mit der Temperatur ist hingegen komplizierter. Um ihn zu beschreiben wurde die Formel von Arrhenius aus der Stoßtheorie benutzt. Diese lautet:

$$k = A \cdot e^{-\frac{\Delta E}{RT}}$$

Formel 15

Da man für zwei Temperaturen auch zwei Werte für  $k_2$  hat, kann man die bekannten Werte in die Formel einsetzen und sich somit die Aktivierungsenergie  $\Delta E$  ausrechnen.

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{e^{-\frac{\Delta E}{RT_1}}}{e^{-\frac{\Delta E}{RT_2}}} = e^{\frac{\Delta E}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}$$

Formel 16

$$\Delta E = \frac{\ln \left( \frac{k_1}{k_2} \right) \cdot R}{\left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}$$

Formel 17

**$\Delta E = 73,56 \text{ kJ}$**

Mit dem erhaltenen  $\Delta E$  lässt sich durch weitere Umformung der Formel 13 lässt sich der Stoßfaktor A berechnen.

$$\mathbf{A = 5,04 * 10^{18} \frac{m^3}{kmol \cdot s}}$$

Durch Einsetzen in Formel 13 lässt sich nun die Geschwindigkeitskonstante für die wahre Reaktionstemperatur berechnen.

Die Zusammengefassten Ergebnisse der obigen Berechnungen sind folgender Tabelle zu entnehmen:

Messung	$p_{O_2}$ [Pa]	$T_{G,mittel}$ [°C]	K	$c_{O_2,G}$ [mol/m <sup>3</sup> ]	$T_{F,mittel}$ [°C]	$D_{O_2}$ [10 <sup>-9</sup> m <sup>2</sup> /s]	$k_2$ [m <sup>3</sup> /(kmol s)]	$\beta$ [m/s]	$n_{O_2}$ [mol/m <sup>2</sup> s]
1	20974	26,5	67,6	0,125	23,5	1,775	5,59E+05	2,87E-04	3,58E-05
2	20972	26,5	67,6	0,125	22,5	1,725	5,06E+05	2,69E-04	3,35E-05
3	20972	25,5	67,2	0,126	22,0	1,700	4,81E+05	2,62E-04	3,29E-05
4	20966	25,5	67,2	0,126	22,0	1,700	4,81E+05	2,62E-04	3,29E-05
5	20966	25,5	67,2	0,126	21,0	1,650	4,34E+05	2,45E-04	3,08E-05
6	20966	26,0	67,4	0,125	21,0	1,650	4,34E+05	2,44E-04	3,06E-05
7	20970	25,5	67,2	0,126	21,0	1,650	4,34E+05	2,45E-04	3,08E-05
8	20970	25,5	67,2	0,126	20,5	1,625	4,12E+05	2,37E-04	2,98E-05
9	20970	25,0	67,0	0,126	20,0	1,600	3,92E+05	2,30E-04	2,90E-05
10	20968	25,0	67,0	0,126	20,5	1,625	4,12E+05	2,38E-04	3,00E-05
11	20970	25,0	67,0	0,126	20,5	1,625	4,12E+05	2,38E-04	3,00E-05
12	20970	24,5	66,8	0,127	20,5	1,625	4,12E+05	2,38E-04	3,02E-05

Tabelle 3 Zusammengefasste Ergebnisse der Berechnung von  $p$ ,  $T_{mittel}$ , K,  $c_{O_2,G}$ ,  $D_{O_2}$ ,  $k_2$ ,  $n_{O_2}$  und  $\beta$

Die Konzentrationsabnahme des  $Na_2SO_3$  in der Kolonne wird von der Sauerstoffmenge, die für die Reaktion zur Verfügung steht begrenzt. Die Sauerstoffaufnahme ist jedoch eine Funktion der Temperatur. Es können daher nur Werte miteinander verglichen werden, die bei gleichen Bedingungen dh. gleicher Temperatur gemessen wurden. Für die obigen Werte trifft das ab der 5. Messung zu. Die daraus gemittelte Molenstromdichte beträgt  **$3,02 * 10^{-5} \text{ Mol/m}^2 \text{ s}$** .

#### 4.2. BERECHNUNG DES MOLENSTROMS $\dot{N}_{O_2}$

Die Absorptionsgeschwindigkeit des Sauerstoffs entspricht der negativen halben Abnahme der Sulfitkonzentration nach der Zeit.

Der Molenstrom ergibt sich daher aus der Abnahme der Konzentration mit der Zeit multipliziert mit dem Flüssigkeitsvolumen und dem stöchiometrischen Faktor. Der Wert  $\frac{dc_{SO_3}}{dt}$  wird durch Auftragen der titrimetrisch bestimmten Konzentrationen gegen die Zeit und das Berechnen der Steigung der Regressionsgeraden bestimmt.

Messung	t [s]	c(Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ) [mol/L]
0	0	0,320
1	300	0,300
2	602	0,283
3	901	0,280
4	1203	0,255
5	1501	0,245
6	1802	0,225
7	2125	0,223
8	2409	0,208
9	2700	0,195
10	3000	0,185
11	3315	0,175
12	3601	0,165

Tabelle 4 die, durch Titration bestimmte, Sulfit-Konzentration zur angeg. Rkt-Zeit

Da, wie bereits oben angemerkt, die Molenstromdichte eine Funktion der Temperatur und weiters der Molenstrom direkt proportional zur Molenstromdichte ist, ergibt sich nur für Werte, die bei konstanter Temperatur gemessen wurden, eine auswertbare Gerade, da für variable Temperaturen das exakte Differential der Funktion beim Messzeitpunkt bestimmt werden müsste, was nicht möglich ist. Zur Bestimmung des Molenstromes wurden wieder die Werte ab der 5. Messung verwendet.

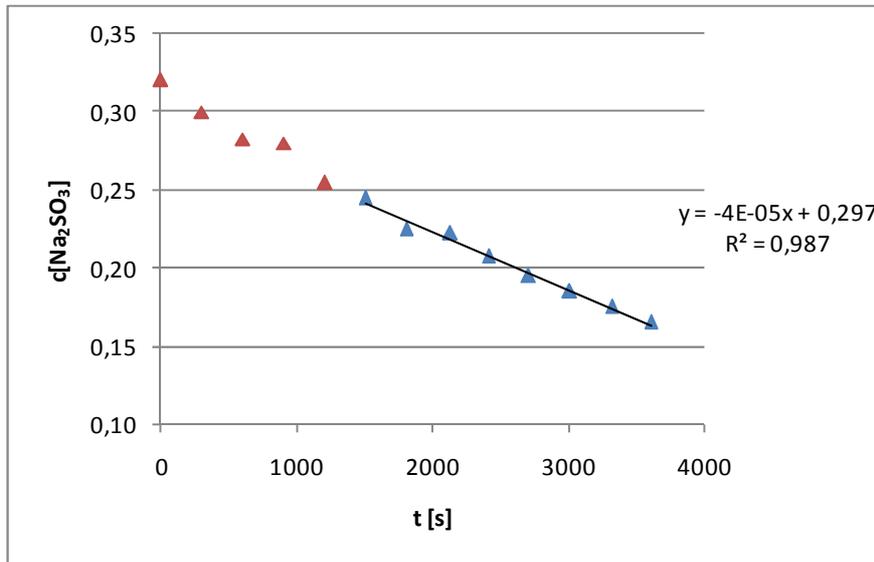


Abbildung 3 Die Änderung der Sulfitkonzentration mit der Zeit

$$\dot{N} = -\frac{k}{2} \cdot V$$

Formel 18

Die exakte Steigung der Gerade beträgt  $-3,17 \cdot 10^{-5}$ . Daraus ergibt sich ein Molenstrom von  $4,64 \cdot 10^{-4}$  Mol/s.

### 4.3. AUSTAUSCHFLÄCHE UND BENETZUNGSGRAD

Die Austauschfläche ergibt sich aus der Formel:

$$A = \frac{\dot{N}_{O_2}}{\dot{n}_{O_2}}$$

Formel 19

Im Bezug auf das Reaktorvolumen erhält man die spezifische Fläche  $A_{\text{spez}}$ . Das Reaktorvolumen errechnet sich mit der Formel für einen Zylinder und beträgt 26,37 L. Wenn man die effektiv wirksame Oberfläche durch die vorhandene Fläche dividiert, erhält man den Benetzungsgrad  $\phi_B$ .

N [mol/s]	A [m <sup>2</sup> ]	A <sub>spez</sub> [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\phi_B$
4,64E-04	15,38	583	1,88

Tabelle 5 Zusammengefasste Ergebnisse der Berechnung von N, A, A<sub>spez</sub>,  $\phi$

4.4. GASDURCHSATZ, VOLUMENDURCHSATZ, GASBELASTUNG UND FLÜSSIGKEITSBELASTUNG

Der Gasdurchsatz  $q_{m,v}$  wird durch die Berechnung des Massendurchfluss  $q_m$  über den Druckabfall im Staurohr  $\Delta p$  bestimmt.

$$q_{m,v} = \sqrt{\frac{1}{\zeta}} \times \varepsilon \times \frac{\pi}{4} \times d^2 \times \sqrt{2\Delta p \rho_G}$$

Formel 20

Der Volumendurchsatz  $q_v$  beträgt:

$$q_{v,v} = \frac{q_m}{\rho}$$

Formel 21

Die Gasbelastung lässt sich wie folgt berechnen:

$$F_v = \frac{q_{v,v}}{A_{Kol}} \cdot \sqrt{\rho}$$

Formel 22

Sehr ähnlich wie die Gasbelastung lässt sich auch die Flüssigkeitsbelastung berechnen. Formelmäßig lässt sie sich wie folgt ausdrücken:

$$U_L = \frac{q_{v,L}}{A_{Kol}}$$

Formel 23

Die errechneten Werte sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Der Druckverlust im Staurohr wurde über alle Messungen des Versuchs gemittelt.

$q_{m,v}$ [kg/s]	$q_{v,v}$ [m <sup>3</sup> /s]	$F_v$ [m/s*(kg/m <sup>3</sup> ) <sup>0,5</sup> ]	$U_L$ [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h]
0,0340	0,0296	1,143	38,585

Tabelle 6 Gasdurchsatz, Flüssigkeitsdurchsatz, Gasbelastung und Flüssigkeitsbelastung

Mit Hilfe von Kennlinien kann über die Gas- und Flüssigkeitsbelastung der theoretische Druckverlust in der Säule bestimmt werden.

$\Delta p_{\text{theoretisch}}$ [Pa/m]	$\Delta p_{\text{praktisch}}$ [Pa/m]
900	257

Tabelle 7 Theoretischer und tatsächlicher Druckverlust in der Säule

## 5. DISKUSSION DER ERGEBNISSE & FEHLERABSCHÄTZUNG

### 5.1. FEHLERQUELLEN BEI DER MESSUNG

- **Ungenauigkeit der Druckmessung**

Der Druck wurde mittels 5 U-Rohren gemessen, die mit gefärbtem Wasser als Sperrflüssigkeit gefüllt waren. Da der Druck während dem Ablesen durch Vibration oder Druckschwankungen permanent um bis zu 3 Millimeter Wassersäule schwankte sind die Änderungen der Drücke mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet. Im Fall der Absolutdruckmessungen liegt der Fehler jedoch im Zehntel-Promille Bereich und ist daher unerheblich. Bei der Bestimmung des Druckverlustes im Staurohr hingegen beträgt der Fehler bis zu ca. 5%. Durch Mitteln der Werte über die gesamte Versuchsdauer wurde versucht dieser Fehler zu minimieren.

- **Fehler bei der Temperaturmessung**

Die Temperaturen wurden digital abgelesen. Um die einzelnen Temperaturen ablesen zu können musste zwischen den unterschiedlichen Messpunkten gewechselt werden. Es dauerte jeweils bis die Temperaturanzeige erneut konstante Werte lieferte. Es konnten daher nie alle Temperaturen zugleich bestimmt werden. Die Temperaturen änderten sich zwar im Laufe des Versuches, jedoch nur so langsam, dass man davon ausgehen kann, dass durch die verzögerte Temperaturmessung kein signifikanter Fehler entstand. Trotzdem muss die Qualität der Temperaturmessung angezweifelt werden, da die Werte bei Berühren des Regelements teilweise um mehrere Grad schwankten und weiters oft unplausible Werte (-5° C) angezeigt wurden.

- **Fehler bei der Titration**

Auch bei der Titration können Fehler entstanden sein. Hier musste zuerst ein genaues Probevolumen entnommen und dann ein genaues Volumen Iod und Natriumthiosulfat zugegeben werden. Dabei kann es zu Ablesefehler der Skalierungen der Messgefäße kommen. Die Ungenauigkeit der Messgefäße ist zu vernachlässigen. Um dem Ablesefehler entgegenzuwirken, wurde die Titration stets von derselben Person durchgeführt. Dadurch kann der Ablesefehler konstanter gehalten werden und wirkt sich daher weniger stark in die Bestimmung des Molenstromes aus, da hierfür nur die Abnahme der Konzentration benötigt wird. Wird nun stets eine zu hohe oder zu niedrige Konzentration gemessen, ändert das die Änderung der Konzentration nicht, solange der Fehler konstant gehalten wird.

### 5.2. VEREINFACHUNGEN

Bei der Bestimmung der Parameter zur Berechnung des Molenstromes und der Molenstromdichte, wurden einige Annahmen getroffen, die so vielleicht nicht stimmen. So geht man bei der Berechnung der Gleichgewichtskoeffizienten und der Diffusionskoeffizienten davon aus, dass sie direkt linear von der Temperatur abhängig sind. Ob dies tatsächlich so ist, ist jedoch zu hinterfragen. Im Falle von K dürfte der Fehler relativ klein sein, da sich die beiden K-Werte bei 20° C und 30°C relativ gesehen nur wenig ändern.

Beim Diffusionskoeffizienten tritt in diesem Intervall jedoch schon eine Änderung von 25% auf. Hier könnte der Fehler größer sein.

Die Abhängigkeit der Geschwindigkeitskonstanten von der Konzentration des Katalysators scheint, wenn man die drei vorhandenen Werte der Temperatur vergleicht, tatsächlich linear zu sein. Die Abhängigkeit vom pH-Wert ist exponentiell, da jedoch der pH-Wert konstant 7,5 betrug, musste hier keine Berechnung durchgeführt werden. Die Abhängigkeit der Geschwindigkeitskonstanten von der Temperatur wurde wie oben beschrieben mit der Arrheniusgleichung beschrieben.

### 5.3. pH-WERT

Ein großer Fehler dürfte durch die Bestimmung des pH-Wertes passiert sein, da dieser mit dem vorhandenen Indikatorpapier nur abgeschätzt werden konnte. Die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Farbschattierungen betrug dabei stets zumindest 0,2. Auch waren sie schwer gegeneinander abzugrenzen.

In dem Bereich in dem pH-Bereich, in dem gearbeitet wurde verursacht ein Fehler im pH-Wert von 0,1 einen Fehler von 4% bei der Berechnung von k. Beträgt der Fehler im pH-Wert jedoch 0,2 so vergrößert sich der Fehler von k bereits auf 20%, was auch einen Fehler von 10% bei der Berechnung der Molenstromdichte nach sich zieht.

Da dieser Fehler doch relativ groß ist, können andere Fehler ihm gegenüber vernachlässigt werden.

## 6. ANHANG

### 6.1. MESSERGEBNISSE

Messung	P1 [cm H <sub>2</sub> O]	P2 [cm H <sub>2</sub> O]	P3 [cm H <sub>2</sub> O]	P4 [cm H <sub>2</sub> O]	P5 [cm H <sub>2</sub> O]	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [ml]
1	4,7	13,8	14,8	11,5	11,3	8,0
2	4,8	13,5	14,7	11,6	11,2	8,7
3	4,8	13,6	14,7	11,5	11	8,8
4	4,7	13,4	14,4	11,6	11	9,8
5	4,7	13,5	14,4	11,4	11	10,2
6	4,8	13,8	14,4	11,3	11,1	11,0
7	4,8	13,8	14,6	11,1	11,1	1,1
8	4,7	13,6	14,6	11	11	1,7
9	4,7	13,8	14,6	10,8	11	2,2
10	4,7	13,8	14,5	10,8	11	2,6
11	4,9	13,9	14,6	10,9	11	3,0
12	4,8	13,9	14,6	11	11	3,4

Tabelle 8 die abgelesenen Druckwerte und der Verbrauch an Natriumthiosulfat-Lsg

Messung	P1 [Pa]	P2 [Pa]	P3 [Pa]	P4 [Pa]	P5 [Pa]
1	99161	100054	100152	99828	99809
2	99171	100024	100142	99838	99799
3	99171	100034	100142	99828	99779
4	99161	100015	100113	99838	99779
5	99161	100024	100113	99818	99779
6	99171	100054	100113	99809	99789
7	99171	100054	100132	99789	99789
8	99161	100034	100132	99779	99779
9	99161	100054	100132	99759	99779
10	99161	100054	100122	99759	99779
11	99181	100064	100132	99769	99779
12	99171	100064	100132	99779	99779

Tabelle 9 die Druckwerte aus cm H<sub>2</sub>O in Pascal umgerechnet

Messung	t [s]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]
1	300	28	25	24	23
2	602	29	24	23	22
3	901	29	22	22	22
4	1203	29	22	22	22
5	1501	29	22	21	21
6	1802	30	22	21	21
7	2125	30	21	21	21
8	2409	30	21	21	20
9	2700	29	21	20	20
10	3000	29	21	21	20
11	3315	29	21	21	20
12	3601	28	21	21	20

Tabelle 10 die abgelesenen Temperaturwerte während der Reaktion

## 6.2. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Vergleich des Henry- und des Raoult'schen Gesetzes mit dem realen Partialdrücken in Abhängigkeit des Molanteils.....	4
Abbildung 2 Fließdiagramm der Versuchsanordnung.....	5
Abbildung 3 Die Änderung der Sulfitkonzentration mit der Zeit .....	9

6.3. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 Stoffeigenschaften der Pall-Ring Füllung .....	4
Tabelle 2 Daten zur Berechnung der Molenstromdichte .....	6
Tabelle 3 Zusammengefasste Ergebnisse der Berechnung von $p$ , $T_{\text{mittel}}$ , $K$ , $c_{\text{O}_2, \text{G}}$ , $D_{\text{O}_2}$ , $k_2$ , $n_{\text{O}_2}$ und $\beta$ .....	7
Tabelle 4 die, durch Titration bestimmte, Sulfit-Konzentration zur angeg. Rkt-Zeit .....	8
Tabelle 5 Zusammengefasste Ergebnisse der Berechnung von $N$ , $A$ , $A_{\text{spez}}$ , $\phi$ .....	9
Tabelle 6 Gasdurchsatz, Flüssigkeitsdurchsatz, Gasbelastung und Flüssigkeitsbelastung .....	10
Tabelle 7 Theoretischer und tatsächlicher Druckverlust in der Säule .....	10
Tabelle 8 die abgelesenen Druckwerte und der Verbrauch an Natriumthiosulfat-Lsg .....	12
Tabelle 9 die Druckwerte aus cm H <sub>2</sub> O in Pascal umgerechnet .....	13
Tabelle 10 die abgelesenen Temperaturwerte während der Reaktion.....	13

6.4. FORMELVERZEICHNIS

Formel 1 .....	2
Formel 2 .....	2
Formel 3 .....	2
Formel 4 .....	3
Formel 5 .....	3
Formel 6 .....	3
Formel 7 .....	3
Formel 8 .....	3
Formel 9 .....	3
Formel 10 .....	4
Formel 11 .....	6
Formel 12 .....	6
Formel 13 .....	6
Formel 14 .....	6
Formel 15 .....	6
Formel 16 .....	7
Formel 17 .....	7
Formel 18 .....	9
Formel 19 .....	9
Formel 20 .....	10
Formel 21 .....	10
Formel 22 .....	10
Formel 23 .....	10

### 6.5. VERZEICHNIS DER VERWENDETEN FORMELZEICHEN UND SYMBOLE

HG ... Henry-Gesetz

RG ... Raoult-Gesetz

$K_H$  ... Henry-Konstante

$P_{0,i}$  ... Sättigungsdruck der Komponente i

k ... Steigung der Ausgleichsgeraden [mol/s]

V ... Volumen des Reaktors [ $m^3$ ]

$\dot{N}$  ... Molenstrom [ $\frac{mol}{s \cdot m^3}$ ]

$\zeta = 3,8468$

$\varepsilon = 0,997$

$d = 0,051[m]$

$\Delta p = cmH_2O \times \rho_{H_2O} \times g$

## 7. REFERENZEN

- Höflinger et al.: Skriptum zu Verfahrenstechnik Laborübungen für Chemiker LVA-Nr: 166.209 ; Version 8.0; WS 09
- Friedl Anton: Thermische Verfahrenstechnik 1, (LVA 159.731 VO 2.0) (Hochschülerschaft der TU Wien)
- Engel T., Reid P.: Physikalische Chemie; 1. Auflage 2006, Pearson Verlag München