

*Versuchsauswertung Chemische Reaktionstechnik*  
FALLFILM

Florian Enzenberger (2033971)  
Sebastian Werner (2033878)

Versuchsbetreuer: E. Sithsen

Versuch durchgeführt am 10.06.06

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Messwerte</b>	<b>2</b>
2.1	Versuchsbedingungen . . . . .	2
2.2	Versuchsergebnisse . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>5</b>
4.1	Fehlerquellen . . . . .	6
<b>Anhang</b>		<b>I</b>
A	Symbolverzeichnis . . . . .	I
B	Abbildungsverzeichnis . . . . .	I
C	Tabellenverzeichnis . . . . .	I
D	Literatur . . . . .	I

## 1 Versuchsbeschreibung

Im Versuch Bestimmung des Diffusionskoeffizienten von  $CO_2$  in Wasser im Fallfilmreaktor soll mit einfachen Mitteln der Stoffübergang von Gas in Flüssigphase untersucht werden. Hierbei wird in der in Abb. 1 gezeigten Anlage gemessen.

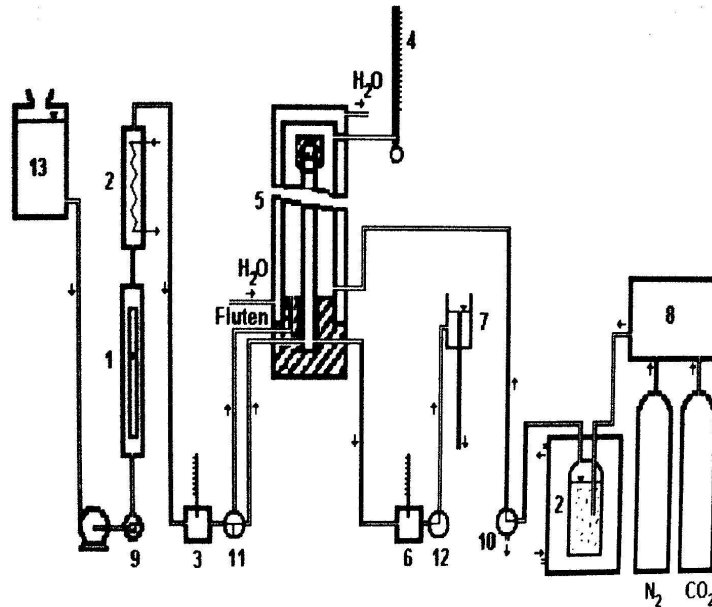


Abbildung 1: Versuchsapparatur Fallfilmreaktor [2, Abbildung III.1]

Von einem Vorratsbehälter (13) wird ein über ein Regulierventil (9) einstellbarer Volumenstrom, welcher Thermostatisiert wird (2) in den Reaktor gefördert. Im Reaktor, welcher zur Thermostatisierung doppelwandig ausgeführt ist und von Wasser durchströmt wird, wird an einem runden Zapfen ein Fallfilm erzeugt. Zusätzlich sind an der Apparatur noch Thermometer angebracht um die Temperatur von Wasser und Gas zu kontrollieren. Der Fallfilm nimmt aus der Gasphase  $CO_2$  auf. Um zu detektieren, wie viel  $CO_2$  aufgenommen wurde, wird wie folgt vorgegangen:

1. Einstellen eines Gasvolumenstromes mit definiertem  $CO_2$ -Anteil über die Gasmischpumpe (8)
2. Durchströmen des Reaktors, bis sich dort die gewünschte Konzentration eingestellt hat
3. Erzeugen von Seifenblasen im Blasenähler (4)
4. Umstellen des Hahnes (10) auf Messen - Kein Frisches Gas kommt mehr in den Reaktor.
5. Ermitteln der Zeit bis eine Seifenblase 3cm gewandert ist. Die Volumenabnahme im Reaktor ist gleichwertig mit dem Volumen  $CO_2$ , welches in den Fallfilm (bzw. in das  $H_2O$ ) diffundiert und so den Reaktor verlässt.
6. Umstellen des Hahnes (10) auf durchstömen

Die Messung wird für jeweils dreimal wiederholt.

Gemessen wird für 2 verschiedene Volumenströme von Wasser, bei jeweils verschiedenen  $CO_2$ -Anteilen in der Gasphase. (30...90%).

## 2 Messwerte

### 2.1 Versuchsbedingungen

<b>Länge des Reaktorkerns:</b>	$L = 0,175 \text{ m}$
<b>Durchmesser des Reaktorkerns:</b>	$d = 0,0195 \text{ m}$
<b>Dichte von Wasser bei <math>20^\circ C</math>:</b>	$\rho = 998 \text{ kg/m}^3$
<b>Henry-Konstante von <math>CO_2</math> in Wasser:</b>	$H = 1,44 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}$
<b>Kinematische Viskosität von Wasser:</b>	$\nu = 1,00 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
<b>Luftdruck im Raum:</b>	$p_{atm} = 98630 \text{ Pa}$
<b>Erdschleunigung:</b>	$g = 9,81 \text{ m}^2/\text{s}$
<b>Korrekturfaktor:</b>	$KF = 0,84$

Tabelle 1: Angaben zur Versuchsauswertung

### 2.2 Versuchsergebnisse

Aus den gemessenen Zeitintervallen  $\Delta t_i$  wird der Mittelwert  $\Delta \bar{t}$  gebildet.

$$\Delta \bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (1)$$

$x_{CO_2}$	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	$\Delta t_3$	$\Delta t_4$	$\Delta t_5$	$\Delta t_6$	$\Delta \bar{t}$
	s	s	s	s	s	s	s
0,9	16,19	16,86	16,84				16,63
0,8	18,12	18,59	18,73	19,19	18,50	18,69	18,63
0,7	21,50	21,74	21,78				21,63
0,6	24,31	26,07	25,28				25,23
0,5	30,84	31,58	30,58	31,05			31,03
0,4	39,81	37,35	42,58	39,32			39,73
0,3	52,43	54,32	55,85	52,03			53,63

Tabelle 2: Messwerte für Versuch 1

$x_{CO_2}$	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	$\Delta t_3$	$\Delta t_4$	$\Delta \bar{t}$
	s	s	s	s	s
0,3	41,32	42,22	41,57		41,70
0,4	31,01	31,67	31,53		31,40
0,5	24,05	24,57	24,52		24,30
0,6	20,13	19,78	19,43		19,70
0,7	17,72	17,23	17,02		17,30
0,8	13,95	13,53	13,96	13,77	13,80
0,9	11,31	12,01	12,05	12,39	11,90

Tabelle 3: Messwerte für Versuch 2

### 3 Ergebnisse

Aus den in Tabelle 2 und 3 auf der vorherigen Seite angegebenen Zeitintervallen  $\Delta t$  kann mit dem Messvolumen  $V_{Mess}$  der Volumenstrom  $\dot{V}_{CO_2}$  des von Wasser absorbierten  $CO_2$  ermittelt werden.

$$\dot{V}_{CO_2} = \frac{V_{Mess}}{\Delta t} \quad (2)$$

Da das ideale Gasgesetz

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (3)$$

gilt, ergibt sich der Stoffstrom  $\dot{n}_{CO_2}$  zu

$$\dot{n}_{CO_2} = \dot{V} \cdot \frac{p}{R \cdot T} \quad (4)$$

Die Diffusionsstromdichte  $J_{CO_2}$  ergibt sich nach [2, Gleichung II.3] zu

$$J_{CO_2} = \frac{\dot{n}_{CO_2}}{A} = \frac{\dot{n}_{CO_2}}{\pi (d + 2\delta) \cdot L} \quad (5)$$

mit der Fallfimdicke  $\delta$  [2, Gleichung II.5]

$$\delta = KF \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \nu_l \cdot \dot{V}_l}{\pi \cdot d \cdot g}} \quad (6)$$

die aufgrund des nichtidealen Verhaltens des Fallfims am Einlauf den Korrekturfaktor  $KF = 0,84$  enthält. Die Diffusionsstromdichte kann mit der Annahme  $c_{CO_2} = 0$  unter Verwendung des Penetrationsmodells nach [2, Gleichung II.2] auch als

$$J_{CO_2} = 2 \sqrt{\frac{D_{CO_2}}{\pi \Theta}} c_{CO_2}^* \quad (7)$$

ausgedrückt werden. Wobei  $\Theta$  [2, Gleichung II.4] die maximale Verweilzeit des fließenden Wassers an der Phasengrenzfläche darstellt.

$$\Theta = \frac{L}{u} = \frac{2}{3} \cdot L \sqrt[3]{\left(\frac{\pi \cdot d}{\dot{V}_l}\right)^2 \frac{3 \cdot \nu_l}{g}} \quad (8)$$

Um den unbekannt Diffusionskoeffizienten  $D_{CO_2}$  zu ermitteln, werden Gleichung 5 und 7 gleichgesetzt und man erhält die Geradengleichung

$$\frac{\dot{n}_{CO_2}}{A} = 2 \sqrt{\frac{D_{CO_2}}{\pi \Theta}} c_{CO_2}^* \quad (9)$$

Aus der Definition von  $\dot{n}_{CO_2}$  (Gleichung 4) und

$$c_{CO_2}^* = \frac{x \cdot p}{R \cdot T} \quad (10)$$

wird ersichtlich, dass der Term  $\frac{p}{R \cdot T}$  gekürzt werden kann:

$$\frac{\dot{n}_{CO_2}}{A} = 2 \sqrt{\frac{D_{CO_2}}{\pi \Theta}} \overbrace{c_{CO_2}^*}^{\frac{x \cdot p}{R \cdot T}} \quad (11)$$

Gleichung 9 wird nun zu

$$\frac{\dot{V}_{CO_2}}{A} = 2\sqrt{\frac{D_{CO_2}}{\pi\Theta}} x_{CO_2} \quad (12)$$

mit einer Geradensteigung, die dem Stoffübergangskoeffizienten  $k_{CO_2}$  entspricht.

$$k_{CO_2} = 2\sqrt{\frac{D_{CO_2}}{\pi\Theta}} \quad (13)$$

Aus Gleichung 13 folgt für  $D_{CO_2}$

$$D_{CO_2} = \frac{k_{CO_2}^2 \cdot \pi \cdot \Theta}{4} \quad (14)$$

Die nach Gleichung 2 ermittelten Volumenströme  $\dot{V}_{CO_2}$  und die, auf die Mantelfläche  $A$  bezogenen, Volumenströme  $\dot{V}_{CO_2}/A$  finden sich in Tabelle 4. Per Definition ist bei einem  $CO_2$ -Gehalt gleich 0 der resultierende Volumenstrom 0. Somit wird der Nullpunkt als zusätzlicher Messpunkt aufgenommen.

	Versuch 1		Versuch 2	
$x_{CO_2}$	$\dot{V}_{CO_2}$	$\dot{V}_{CO_2}/A$	$\dot{V}_{CO_2}$	$\dot{V}_{CO_2}/A$
	$m^3/s$	$m/s$	$m^3/s$	$m/s$
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,3	$1,804 \cdot 10^{-7}$	$1,664 \cdot 10^{-5}$	$7,194 \cdot 10^{-8}$	$6,623 \cdot 10^{-6}$
0,4	$1,610 \cdot 10^{-7}$	$1,485 \cdot 10^{-5}$	$9,553 \cdot 10^{-8}$	$8,795 \cdot 10^{-6}$
0,5	$1,384 \cdot 10^{-7}$	$1,277 \cdot 10^{-5}$	$1,231 \cdot 10^{-7}$	$1,133 \cdot 10^{-5}$
0,6	$1,190 \cdot 10^{-7}$	$1,097 \cdot 10^{-5}$	$1,517 \cdot 10^{-7}$	$1,396 \cdot 10^{-5}$
0,7	$9,674 \cdot 10^{-8}$	$8,921 \cdot 10^{-6}$	$1,732 \cdot 10^{-7}$	$1,594 \cdot 10^{-5}$
0,8	$7,544 \cdot 10^{-8}$	$6,958 \cdot 10^{-6}$	$2,174 \cdot 10^{-7}$	$2,001 \cdot 10^{-5}$
0,9	$5,591 \cdot 10^{-8}$	$5,156 \cdot 10^{-6}$	$2,513 \cdot 10^{-7}$	$2,313 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 4:  $CO_2$ -Volumenströme

Eine Auftragung der flächenspezifischen Volumenströme  $\dot{V}_{CO_2}/A$  gegen den Molenbruch  $x_{CO_2}$  mit den Trendlinien der Geradengleichung 12 geschieht in den folgenden Abbildungen. Hieraus kann nun grafisch oder rechnerisch der, der Geradensteigung entsprechende, Stoffübergangskoeffizient  $k_{CO_2}$  ermittelt werden.

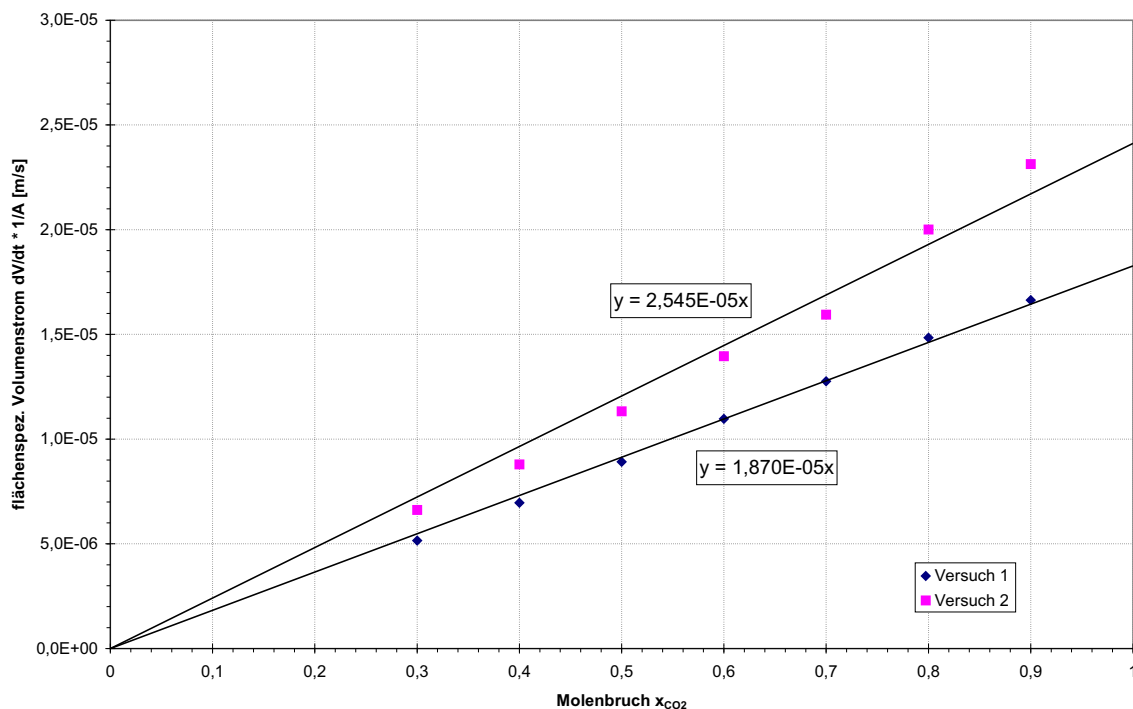


Abbildung 2: Grafische Bestimmung des Diffusionskoeffizienten

Mit den Gleichungen 8 bis 14 erhält man folgende Ergebnisse.

			Versuch 1	Versuch 2
Skalenteile	$SKT$		15	20
Volumenstrom	$\dot{V}_l$	$l/h$	1,68	2,54
Volumenstrom	$\dot{V}_l$	$m^3/s$	$4,667E - 07$	$7,056E - 07$
Messvolumen	$V_{mess}$	$ml$	3	
Verweilzeit	$\Theta$	$s$	2,033	1,543
Filmstärke	$\delta$	$m$	$1,115E - 04$	$1,280E - 04$
Mantelfläche	$A$	$m$	$1,084E - 02$	$1,086E - 02$
Stoffübergangskoeffizient	$k_{CO_2}$	$m/s$	$1,870E - 05$	$2,545E - 05$
Diffusionskoeffizient	$D_{CO_2}$	$m^2/s$	$5,582E - 10$	$7,851E - 10$

Tabelle 5: Ermittlung des Diffusionskoeffizienten

## 4 Diskussion

Zur besseren Bewertung der ermittelten Diffusionskoeffizienten, werden diese mit Literaturwerten aus [1, Table 4] verglichen. Die Werte sind in Tabelle 6 aufgelistet und in Abbildung 3 grafisch aufgetragen.

Quelle	$D_{CO_2} [10^{-9} m^2 \cdot s^{-1}]$
diese Arbeit Versuch 1	0,56
diese Arbeit Versuch 2	0,79
ROWLEY et al. (1997)	$2,03 \pm 0,10$
AL-GHAWAS et al. (1989)	$1,95 \pm 0,05$
TANG and SANDALL (1985)	1,98
VIVIAN and KING (1964)	$2,00 \pm 0,07$
PEREZ and SANDALL (1973)	1,98
HIMMELBLAU (1964)	von 1,74 bis 1,94
TAKAHASHI et al. (1982)	1,97
PERRY and GREEN (1984)	1,96
CLARKE (1964)	2,05; 1,96

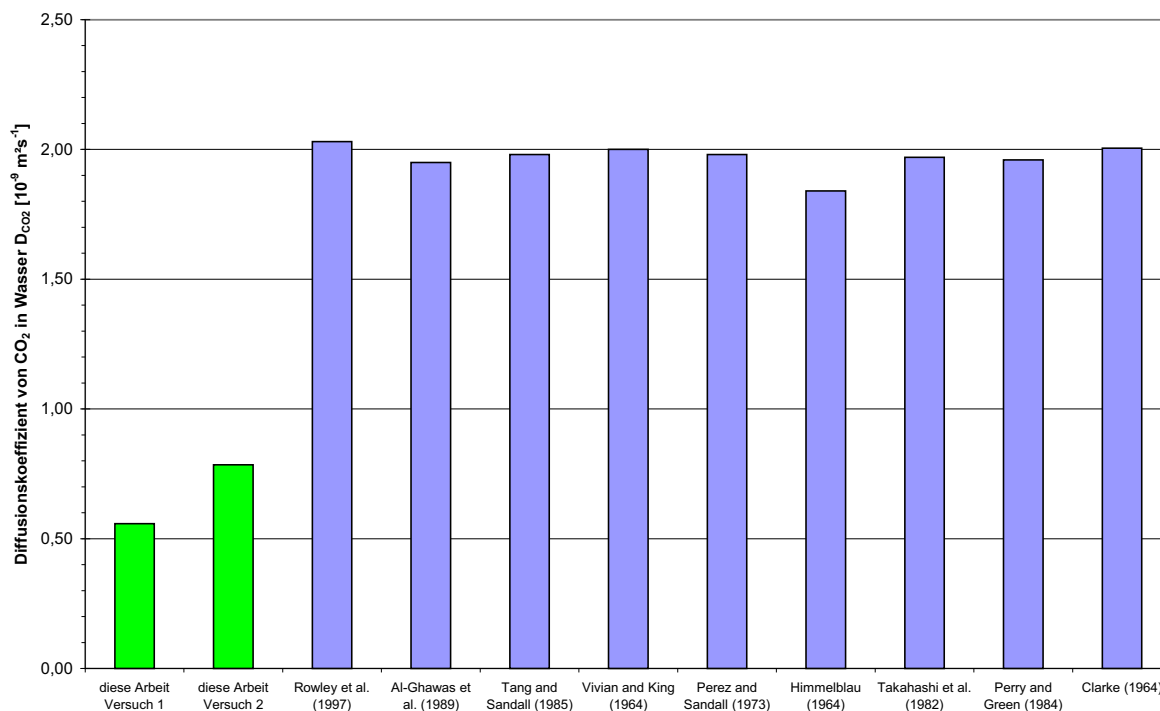
Tabelle 6: Diffusionskoeffizienten von  $CO_2$  in Wasser bei 298 K [1, Table 4]

Abbildung 3: Vergleich der Diffusionskoeffizienten

Es fällt auf, dass die eigenen Werte um 72 bzw. 60 % von den Literaturwerten abweichen. Dies könnte darin begründet liegen, dass aufgrund einer relativ kurzen Verweilzeit keine vollkommene Gleichgewichtseinstellung stattfindet. Diese Vermutung wird dadurch untermauert, dass bei einem höheren Volumenstrom, der Diffusionskoeffizient höher liegt.

#### 4.1 Fehlerquellen

- Die Zeitnahme ist aufgrund der menschlichen Reaktionszeit nicht exakt.



- Die Blasensinkgeschwindigkeit im Blasenähler ist nicht konstant, sondern kann durch Unregelmäßigen, wie z.B. das Platzen von Blasen beeinflusst werden.
- Die Temperatur ist nicht konstant sondern erhöht sich aufgrund der Wärmefreisetzung der Pumpen im Laufe des Versuches von  $21,8$  auf  $23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Temperatur geht aufgrund des Kürzens zwar nicht direkt in die Ermittlung des Stoffübergangskoeffizienten ein, jedoch fließen indirekt über Viskosität und Dichte Temperaturschwankungen mit ein.
- Wenn der Fallfilmzylinder nicht absolut senkrecht steht, führt dies zu einer ungleichmäßigen Ausbildung des Fallfilms.
- Durch die vielen Dichtstellen kann Luft eindringen und die Messung verfälschen.

## Anhang

### A Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$A$	Fläche	$m^2$
$c_i^*$	Konzentration an Phasengrenze	$\frac{mol}{m^3}$
$d$	Durchmesser des Reaktors	$m$
$D_i$	Diffusionskoeffizient	$\frac{m^2}{s}$
$H$	HENRY Konstante	$Pa$
$g$	Erdbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
$J$	Diffusionsstromdichte	$\frac{mol}{m^2 \cdot s}$
$k_i$	Stoffübergangskoeffizient	$\frac{m}{s}$
$KF$	Korrekturfaktor	-
$L$	Länge des Reaktors	$m$
$n$	Molzahl	$mol$
$\dot{n}$	Molenstrom	$\frac{mol}{s}$
$p$	Druck	$Pa$
$p_{atm}$	Luftdruck	$Pa$
$t$	Zeit	$s$
$\Delta t$	Zeitintervall	$s$
$V$	Volumen	$m^3$
$V_{Mess}$	Messvolumen	$m^3$
$x_i$	Molenbruch	-
$\delta$	Schichtdicke	$m$
$\nu$	Kinematische Viskosität	$\frac{m^2}{s}$
$\rho$	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
$\Theta$	Maximale Kontaktzeit	$s$

### B Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsapparatur Fallfilmreaktor [2, Abbildung III.1]	1
2	Grafische Bestimmung des Diffusionskoeffizienten	5
3	Vergleich der Diffusionskoeffizienten	6

### C Tabellenverzeichnis

1	Angaben zur Versuchsauswertung	2
2	Messwerte für Versuch 1	2
3	Messwerte für Versuch 2	2
4	$CO_2$ -Volumenströme	4
5	Ermittlung des Diffusionskoeffizienten	5
6	Diffusionskoeffizienten von $CO_2$ in Wasser bei 298 K [1, Table 4]	6

### D Literatur

[1] Measurement of diffusion Coefficients Important in Modeling the Absorption Rate of Carbon Dioxide into Aqueous N-Methyldiethanolamine. In: *J. Chem. Eng. Data* 42 (1997), S. 310–317

- [2] Lehrstuhl fuer Chemische Reaktionstechnik: *Versuchsbeschreibung Fallfilmreaktor*. Mar 2000