



## PROTOKOLL REAKTIONSTECHNIK II

### SÜK Stoffübergang im begasten Rührkessel

#### Teilnehmer:

Carolin Lohmann  
Anna Tietjen  
Roman-Luca Zank

Gruppe:	III
Protokollführer:	Roman-Luca Zank
Datum der Versuchsdurchführung:	13.10.2020
Abgabedatum:	13.10.2020

Merseburg den 13.10.2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Geräte und Chemikalien</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Berechnungen</b>	<b>3</b>
4.1	Allgemeine Daten und Annahmen . . . . .	3
4.2	Messdaten und Berechnungen . . . . .	4
4.3	Weitere Berechnungen . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Fehlerbetrachtung</b>	<b>10</b>

# 1 Einleitung

Im folgenden Protokoll werden generierte Messdaten zum Versuch *SÜK - Stoffübergang im begasten Rührkessel* ausgewertet. Ziel ist es mithilfe des Praktikums und den ermittelten Messdaten Aussagen über den Stoffübergangsprozess eine Absorption zu treffen. Untersucht wird hierfür Leistungswasser in einem Rührkessel, welches per Druckluft zugeführten Sauerstoff absorbiert. Als Parameter wird die Drehzahl des Rührers variiert. Alle weiteren Betriebsvorgaben, wie Rührertyp oder Temperatur des Wasser werden konstant gehalten. In der Auswertung dieses Protokolls sollen die verschiedenen Betriebszustände der Rührerdrehzahl miteinander verglichen werden.

## 2 Geräte und Chemikalien

### Geräte:

- Rührkessel mit Rührer (hier: Ankerrührer)
- Sauerstoffsonde FDO® 925
- Dreikanal-Tisch-Messgerät INOLAB® MULTI 9430 IDS
- Metallröhrchen und Schläuche

### Proben/Chemikalien:

- Leitungswasser
- Stickstoff-Gas
- Druckluft

## 3 Durchführung

Um den Einfluss der Rührerdrehzahl auf den Absorptionsprozess zu untersuchen, wird zunächst das Absorptionsmittel, in diesem Fall Leitungswasser, in den Rührbehälter gegeben. Das Thermostat, welches eine konstante Wassertemperatur gewährleistet, wird auf 20 °C eingestellt. Danach folgen das Anbringen des Rührers, des gasführenden Metallröhrchens, sowie der Sauerstoffsonde, welche für dieses Praktikum bereits in den entsprechenden Halterungen am Rührkessel montiert wurden. Bei langsamer Drehzahl wird nun überprüft ob der Rührer gegen die zuvor montierte Sauerstoffsonde oder das Metallröhrchen schlägt.

Nach dem Aufbauen der Apparatur wird nun gewartet bis sich das Wasser mit drehenden Rührer auf 20 °C erwärmt. Überprüft wird dies mit der Sauerstoffsonde, welche ebenfalls einen Temperaturfühler besitzt. Gleichzeitig wird mittels Stickstoff der sich im Leistungswasser befindende Sauerstoff ausgetrieben. Dies erfolgte im Praktikum nicht vollständig, sondern jeweils bis zu einem Wert von rund  $0,18 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$  an Sauerstoff.

Nun kann mit dem eigentlichen Versuch begonnen werden und es wird bei festgelegter Drehzahl der Luftsauerstoff konstant zugeführt. Gemessen wird der Volumenstrom an zugeführter Luft mittels Schwebekörperdurchflussmesser in L/min. Im Praktikum wurde sich auf einen Volumenstrom von rund  $0,50 \frac{\text{L}}{\text{min}}$  festgelegt. Mit Beginn der Luftzufuhr wird ebenfalls die Messung bzw. das Logging der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration im 5s-Intervall gestartet. Beendet wird die Messung bei einer Sauerstoffkonzentration von rund  $8,7 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ .

Für eine erneute Messung mit neuer Drehzahl wird ebenfalls wird der absorbierte Sauerstoff mit Stickstoff ausgetrieben und die Messung erneut gestartet.

## 4 Ergebnisse und Berechnungen

### 4.1 Allgemeine Daten und Annahmen

Als allgemeine Daten werden unter diesen Abschnitt Daten aufgeführt, welche lediglich einmalig für das Praktikum bestimmt wurden und nicht mit jeder Messerreihe erneut gemessen wurden (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Allgemeine Daten

Umgebungsdruck $p_u$ [bar]	Rührerdurchmesser $d_R$ [m]	Luftvolumenstrom $\dot{V}$ $\frac{\text{L}}{\text{min}}$
1,013	0,11	0,5

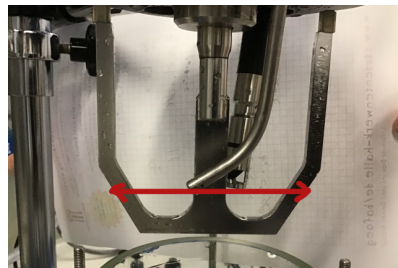


Abb. 1: angenommener Durchmesser am Ankerrührer

Der Rührerdurchmesser wird für die Berechnung der Reynoldszahl auf Höhe des einleitenden Gases angenommen (siehe Abb. 1).

Ebenfalls werden unter diesem Abschnitt die getroffenen Annahmen für die folgenden Berechnungen aufgeführt (siehe Tab. 2).

Tab. 2: Annahmen

Bezeichnung	Annahme	Begründung
Dichte Wasser	$\rho_{\text{H}_2\text{O}} \approx \text{const.}$	Wassertemperatur ändert sich unwesentlich ( $\Delta T = 0,4 \text{ K}$ )
Viskosität Wasser	$\nu_{\text{H}_2\text{O}} \approx \text{const.}$	Wassertemperatur ändert sich unwesentlich ( $\Delta T = 0,4 \text{ K}$ )
Partialdruck Sauerstoff	$p_{\text{O}_2}^* \approx p_{\text{Umgebung}}$	$\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{Umgebung}}} \ll 1 \rightarrow$ vernachlässigbar
Sauerstoffanteil	$x_{\text{O}_2} = 0,21$	realitätsnaher Wert
Stoffmenge	$n_{\text{ges}} \approx n_{\text{H}_2\text{O}}$	$\frac{n_{\text{O}_2}}{n_{\text{H}_2\text{O}}} \ll 1 \rightarrow$ vernachlässigbar

## 4.2 Messdaten und Berechnungen

Es wurden für dieses Praktikum drei Messreihen durchgeführt, welche Drehzahlen von  $80 \frac{1}{\text{min}}$ ,  $110 \frac{1}{\text{min}}$  und  $140 \frac{1}{\text{min}}$  umfassten. In Abbildung 2 sind zunächst die Konzentrationsverläufe der einzelnen Messreihen dargelegt. Bereits an dieser Stelle fällt auf, dass Messreihe 1 mit  $80 \frac{1}{\text{min}}$  einen abweichenden Kurvenverlauf zu den übrigen Messreihen aufzeigt. Weiterhin erkennbar ist, dass ohne Betrachtung von Messreihe 1, Messreihe 3 mit  $140 \frac{1}{\text{min}}$  den steileren Kurvenverlauf zeigt. In Gleichung (1) ist die Umrechnung der gemessenen Konzentration  $\frac{\text{mg}}{\text{L}}$  in  $\frac{\text{mmol}}{\text{L}}$  zu finden.

$$c = \frac{\beta}{M} = \frac{10 \frac{\text{g}}{\text{L}}}{32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 0,313 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \quad (1)$$

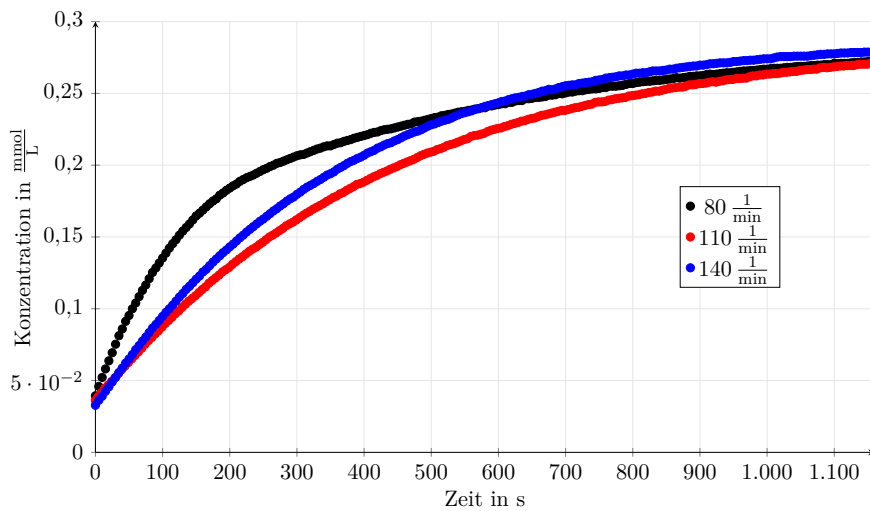


Abb. 2: Konzentrationsverläufe für verschiedene Drehzahlen

In Abbildung 3 wird nun die Stoffmengenänderungsgeschwindigkeit gegenüber der Konzentration aufgetragen. Die Berechnung der Stoffmengenänderungsgeschwindigkeit ist in Gleichung (2) nachzuvollziehen. Auch in dieser Abbildung fällt Messreihe 1 mit dem Verlauf der Datenpunkten gegenüber den übrigen Messreihen auf. Dies legt die Vermutung nahe, dass Messreihe 1 einer fehlerhaften Durchführung unterlegen sein könnte. Ansonsten zeigt sich neben Messreihe 1, erneut Messreihe 3 mit der höchsten Drehzahl auch mit dem steilsten Abfall der Regressionsgeraden.

$$R = \frac{\Delta c}{\Delta t} = \frac{3,91 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mmol}}{\text{L}} - 3,28 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mmol}}{\text{L}}}{10 \text{ s} - 0 \text{ s}} = 6,25 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mmol}}{\text{L} \cdot \text{s}} \quad (2)$$

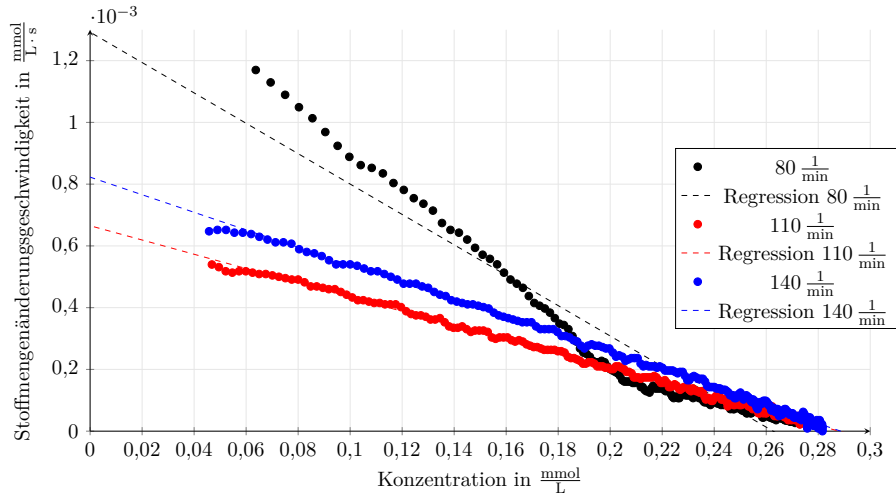


Abb. 3: Stoffmengenänderungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Konzentration für verschiedene Drehzahlen (geglättete Messwerte)

*Regressionsgeraden:*

$$y_{80} = -4,92 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,29 \cdot 10^{-3}$$

$$y_{110} = -2,31 \cdot 10^{-3} \cdot x + 6,65 \cdot 10^{-4}$$

$$y_{140} = -2,85 \cdot 10^{-3} \cdot x + 8,23 \cdot 10^{-4}$$

In einer weiteren Abbildung (siehe Abb 5) werden die Stoffübergangskoeffizienten  $k_l \cdot a$  der Reynoldszahl  $Re$  gegeneinander aufgetragen. Es wird an dieser Stelle bewusst auf Messreihe 1 verzichtet, da die vorangegangenen Auswertungen die Plausibilität dieser Messreihe nicht stützen. Für Messreihe 2 und 3 wurden jeweils ein differentieller Ansatz und ein integraler Ansatz zur Bestimmung des Stoffübergangskoeffizienten verfolgt. Diese unterschiedlichen Ansätze führen zu unterschiedlichen jedoch ähnlichen Ergebnissen (siehe Abb. 5). Es lässt in dieser Abbildung bereits erkennen, dass mit höheren Reynoldszahlen höhere Stoffübergangskoeffizienten erreicht werden.

Die Berechnung der Reynoldszahl mittels Rührerdrehzahl  $n$ , Rührerdurchmesser  $d_R$  und kinetischer Viskosität  $\nu$  ist unter Gleichung (3) darstellt.

$$\begin{aligned} Re &= \frac{(d_R)^2 \cdot n \cdot \pi}{\nu} = \frac{(0,11 \text{ m})^2 \cdot 80 \frac{1}{\text{min}} \cdot \pi}{10 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \\ &= \frac{(0,11 \text{ m})^2 \cdot 1,333 \frac{1}{\text{s}} \cdot \pi}{10 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \\ &= \underline{50\,684} = 5 \cdot 10^4 \end{aligned} \quad (3)$$

Für den differentiellen Ansatz wird lediglich der Betrag, des Anstiegs, der jeweiligen Regressionsgeraden unter Abb. 3 genutzt. Dieser entspricht dem differentiellen Stoffübergangskoeffizienten  $[k_l \cdot a]_{diff}$ . Ebenfalls lässt sich in diesem Schritt die Phasenkonzentration im Gleichgewicht  $c^*$  bestimmen. Hierfür wird aus der Regressiongeraden der Schnittpunkt mit der x-Achse berechnet (siehe Gleichung (4)). Die Werte hierfür sind in Tabelle Tab. 3 aufgeführt.

$$\begin{aligned}
y &= m \cdot x + n = y_{110} = -2,31 \cdot 10^{-3} \cdot x + 6,65 \cdot 10^{-4} \\
x(\text{für } y = 0) &= c^* = \frac{-n}{m} \\
c_{110}^* &= \frac{-6,65 \cdot 10^{-4}}{-2,31 \cdot 10^{-3}} \\
&= \underline{2,89 \cdot 10^{-1} \frac{\text{mmol}}{\text{L}}}
\end{aligned} \tag{4}$$

Für den integralen Ansatz ist zunächst  $c^*$  zu bestimmen. In dieser Auswertung wird davon ausgegangen, dass die letzte aufgenommene Konzentration  $c$  der Konzentration  $c^*$  entspricht. Diese Konzentration  $c^*$  wird dann, wie in Abbildung 4 gegen die Zeit aufgetragen. Der Anstieg dieser Regressionsgeraden entspricht dann wiederum  $[k_l \cdot a]_{int}$ . Eine Berechnung des  $[k_l \cdot a]_{int}$  ist unter Gleichung (6) zu finden.

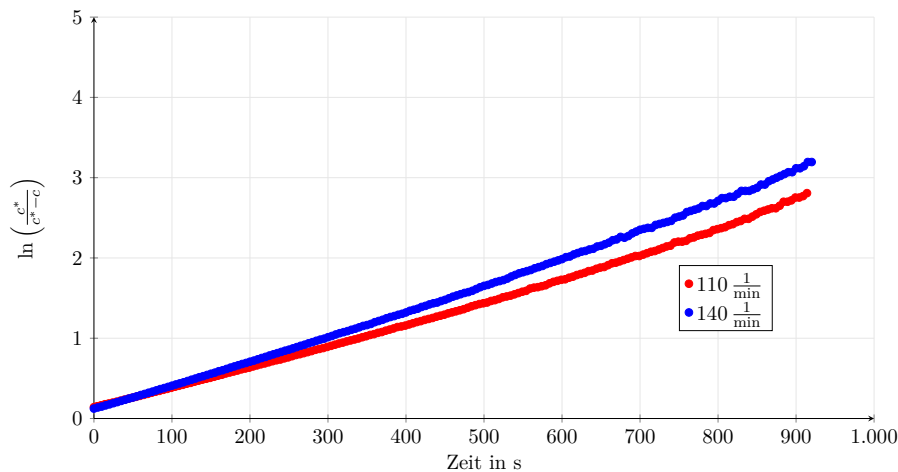


Abb. 4: Integraler Ansatz zur Bestimmung des  $[k_l \cdot a]_{int}$

*Regressionsgleichungen:*

$$\begin{aligned}
y_{110} &= 2,84 \cdot 10^{-3} \cdot x + 0,064 \\
y_{140} &= 3,30 \cdot 10^{-3} \cdot x + 0,045
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
y &= m \cdot x + n = y_{110} = 2,84 \cdot 10^{-3} \cdot x + 0,064 \\
[k_l \cdot a]_{int} &= m \\
&= \underline{2,84 \cdot 10^{-3} \frac{1}{s}}
\end{aligned} \tag{6}$$

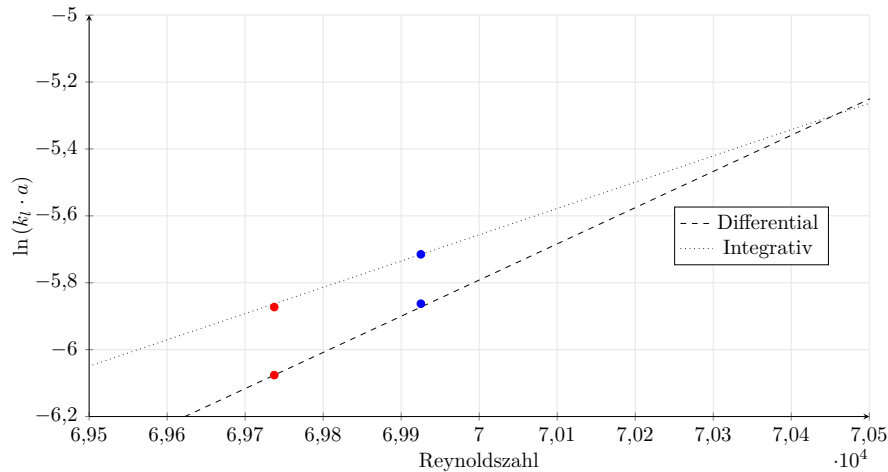


Abb. 5: Natürlich logarithmierter Stoffübertragungskoeffizient  $k_l \cdot a$  in Abhängigkeit der Reynoldszahl  $Re$  für verschiedene Drehzahlen

Regressionsgeraden:

$$y_{\text{diff}} = 1,08 \cdot 10^{-3} \cdot x - 81,53$$

$$y_{\text{int}} = 7,85 \cdot 10^{-4} \cdot x - 60,64$$

### 4.3 Weitere Berechnungen

In diesem Abschnitt werden Beispielrechnungen für weitere geforderte Werte wie der HENRY-Konstante oder der effektiven Reaktionsgeschwindigkeit dargelegt. Es wird sich hierbei lediglich auf Vorberechnungen der differentiellen Methodik berufen.

#### Henry-Konstante

$$\begin{aligned}
 H [\text{bar}] &= \frac{p_u \cdot x_{\text{O}_2}}{c^* \cdot n_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}} \\
 H_{80} &= \frac{1,013 \text{ bar} \cdot 0,21}{2,63 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \cdot 55,45 \text{ mol} \cdot 1 \text{ L}} \\
 &= \underline{\underline{44\,937 \text{ bar}}}
 \end{aligned} \tag{7}$$

$r_{\text{effektiv}}$  wenn Konzentration um 10% bei Bulk absinkt

$$\begin{aligned}
 r_{\text{effektiv}} &= k_l \cdot a \cdot (c^* - c^* \cdot 0,9) \\
 r_{\text{effektiv},110} &= 2,30 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} \cdot \left( 2,89 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{L}} - 0,9 \cdot 2,89 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) \\
 &= \underline{\underline{6,63 \cdot 10^{-8} \frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{s}}}}
 \end{aligned} \tag{8}$$



RZA für 100 % Stoffumsatz bei  $M = 100 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

$$\begin{aligned}
 RZA &= r_{\text{effektiv}} \cdot (M + M_{\text{O}_2}) \\
 RZA_{110} &= 6,63 \cdot 10^{-8} \frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{s}} \cdot \left( 100 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right) \\
 &= \underline{8,76 \cdot 10^{-6} \frac{\text{g}}{\text{L} \cdot \text{s}}} \quad (9)
 \end{aligned}$$

Tab. 3: Zusammenfassende Werte

Betrachteter Wert	80 $\frac{1}{\text{s}}$	110 $\frac{1}{\text{s}}$	140 $\frac{1}{\text{s}}$
$[k_l \cdot a]_{\text{diff}} \left[ \frac{1}{\text{s}} \right]$	$5,06 \cdot 10^{-3}$	$2,30 \cdot 10^{-3}$	$2,82 \cdot 10^{-3}$
$c_{\text{diff}}^* \left[ \frac{\text{mmol}}{\text{L}} \right]$	$2,63 \cdot 10^{-1}$	$2,89 \cdot 10^{-1}$	$2,89 \cdot 10^{-1}$
$[k_l \cdot a]_{\text{int}} \left[ \frac{1}{\text{s}} \right]$	$3,81 \cdot 10^{-3}$	$2,84 \cdot 10^{-3}$	$3,30 \cdot 10^{-3}$
$c_{\text{int}}^* \left[ \frac{\text{mmol}}{\text{L}} \right]$	$2,72 \cdot 10^{-1}$	$2,74 \cdot 10^{-1}$	$2,82 \cdot 10^{-1}$
REYNOLDSZAHL	$5,06 \cdot 10^4$	$6,97 \cdot 10^4$	$6,99 \cdot 10^4$
HENRY-Konstante [bar]	44 937	40 837	40 751
$r_{\text{effektiv}} \left[ \frac{\text{mol}}{\text{L} \cdot \text{s}} \right]$	$1,33 \cdot 10^{-7}$	$6,63 \cdot 10^{-8}$	$8,15 \cdot 10^{-8}$
$RZA \left[ \frac{\text{g}}{\text{L} \cdot \text{s}} \right]$	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$8,76 \cdot 10^{-6}$	$1,08 \cdot 10^{-5}$
Plausibel ?	eher nicht	ja	ja

## 5 Diskussion

Aus den Ergebnissen des Praktikumsversuches und den Berechnungen lässt sich zunächst erkennen, dass sich die Messreihe 1 als nicht plausibel herausstellt. Dies lässt sich auf Durchführungsfehler während des Praktikums zurückführen. Die Messreihen 2 und 3 zeigen jedoch verwertbare Daten aus denen Mögliche Schlüsse gezogen werden können.

Zunächst zeigt sich in Abb. 2, dass in der gleichen Zeit Messreihe 3 mit  $140 \frac{1}{\text{min}}$  eine höhere Sauerstoffkonzentration erreicht als Messreihe 2 mit  $110 \frac{1}{\text{min}}$ . Als These lässt sich hierbei in den Raum stellen, dass bei höheren Drehzahlen ein besserer Stoffübergang erfolgt.

Auch in Bezug auf die Stoffmengenänderungsgeschwindigkeiten zeigt Messreihe 3 eine effizientere Performance als Messreihe 2. Zu sehen ist dies an dem steileren Abfall der jeweiligen Regressionsgeraden (siehe Abb. 3), welcher einem schnelleren Umsatz entspricht. Betrachtet man Abbildung 5 so sind

## 6 Fehlerbetrachtung

Für Fehler wird hauptsächlich die Messreihe 1 mit  $80 \frac{1}{\text{min}}$  betrachtet. Da sich in den Leitungen für die Sauerstoffzufuhr noch Stickstoff vom Stripping-Prozess befand kam es zur Beeinträchtigung der Messwerte. Daraufhin wurde die Sauerstoffzufuhr nachgeregelt. Aufgrund dieser Tatsache ist empfehlenswert die erste Messreihe zu wiederholen. Da die Messreihen 2 und 3 einen ähnlichen, jedoch nicht gleichen Verlauf der Messdaten anzeigen, kann hier auf eine Wiederholung der Versuchsdurchführung verzichtet werden.

Ansonsten lassen sich die getroffenen Annahmen unter Abschnitt 4 eventuell anzweifeln, welche zu Anfang der Auswertung der Messdaten getroffen wurden. Zusätzlich dazu unterliegen Messeinrichtungen immer gewissen Schwankungen, sowie Fehlertoleranzen. Diese sind jedoch weder im Praktikum noch in der Auswertung nicht negativ aufgefallen.