

Versuchsauswertung Trenntechnik
ABSORPTION

Mario Di Franca (*2033543*)
Florian Enzenberger (*2033971*)
Sebastian Werner (*2033878*)

Versuchsbetreuer: Dipl.-Ing. J. Rolker

Durchgeföhrt am 27.1.2005

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsbeschreibung	1
1.1	Der Absorptionsvorgang	1
1.2	Der Desorptionsvorgang	1
1.3	Absorption als Trennverfahren	1
1.4	Versuchsaufbau	1
1.5	Durchführung	2
2	Messreihen	3
2.1	Versuchsbedingungen	3
2.2	Versuchsergebnisse	3
2.3	Stoffwerte	4
3	Ergebnisse	5
3.1	Ermittlung der Gleichgewichtslinie	5
3.2	Absorptionsversuche	6
3.3	Desorptionsversuche	8
3.4	Stoffmengenbilanz	10
3.4.1	Bilanz um Absorber	11
3.4.2	Bilanz um Desorber	11
3.4.3	Bilanz um Gesamtanlage	11
3.5	Enthalpiebilanz	12
3.5.1	Bilanz um Absorber	13
3.5.2	Bilanz um Desorber	13
3.5.3	Bilanz um den Wärmeübertrager	13
3.5.4	Bilanz um die Heizung	14
3.5.5	Bilanz um den Kühler	14
4	Diskussion der Ergebnisse und Fehlerbetrachtung	14
4.1	Absorption	14
4.2	Desorption	15
4.3	Stoffmengenbilanz	16
4.4	Enthalpiebilanz	17
4.5	Fehlerquellen	17

1 Versuchsbeschreibung

1.1 Der Absorptionsvorgang

Bei der Absorption handelt es sich um eine Auflösung eines oder mehrerer Gases in einer Waschflüssigkeit. Hierdurch entsteht letztendlich ein mit Gas beladenes Lösungsmittel, welches üblicherweise nach der Absorption durch Desorption regeneriert wird, was eine kontinuierliche Nutzung des Lösungsmittels ermöglicht. Wie auch bei der Adsorption kann zwischen Physisorption und Chemisorption unterschieden werden. Bei der Physisorption erfolgt die Bindung über verhältnismäßig schwache Van-der-Waals bzw. elektrostatische Kräfte, während bei der Chemisorption ionische oder kovalente Bindungen ausgebildet werden. Dem Absorptionsvorgang setzt hierbei Wärme frei, die Absorptionsenthalpie. Während eine Physisorption der leichten Umkehrbarkeit hat, besitzt die Chemisorption den Vorteil der hohen Selektivität.

1.2 Der Desorptionsvorgang

Um den beladenen Flüssigkeitsstrom wieder vom gelösten Gas zu befreien, muss bei einer Physisorption entweder eine Temperaturerhöhung vorgenommen werden oder durch Zuführen eines Stripgases der Partialdruck erniedrigt werden. Bei einer Chemisorption ist eine wesentlich stärkere Temperaturerhöhung erforderlich um das Reaktionsgleichgewicht zu verschieben.

1.3 Absorption als Trennverfahren

Die Absorption wird industriell zur Trennung von Gasgemischen und zur Abtrennung von Schadstoffen aus Abgasen eingesetzt. Im ersteren Fall wird meist eine Physisorption durchgeführt, während für die strengen Forderungen zur Endreinheit eine Chemisorption genutzt wird. Im Versuch wird hierbei CO_2 aus einem Luftstrom abgetrennt. Als Waschflüssigkeit dient hierbei Wasser. Die Desorption wird hierbei durch Zuführen des Stripgases Luft und durch Temperaturerhöhung des Wassers erreicht.

1.4 Versuchsaufbau

Als Versuchsanlage dient die in Abbildung 1 schematisch dargestellte Laboranlage der Firma FISCHER. Hierbei wird zuerst Druckluftstrom mit einem definierten Anteil an CO_2 versetzt und im Gegenstrom zu Wasser durch eine Füllkörperkolonne (Absorber) geleitet. Nach der Absorption wird der Gehalt an CO_2 in der Abluft bestimmt. Der beladene Flüssigkeitsstrom wird nun zuerst einem Wärmeübertrager, dann durch eine Heizung erwärmt und im Gegenstrom mit Stripgas desorbiert. Der CO_2 -Gehalt des Abgases wird auch hier bestimmt. Die Waschflüssigkeit wird nach der Desorption zuerst im Wärmetauscher und dann durch einen Wasserkühler zurück auf Ausgangstemperatur gebracht und wieder der Absorptionskolonne zugefügt. Eine Temperaturmessung findet hierbei an folgenden Stellen statt: Vor und nach der Absorption bei Gas- bzw. Flüssigkeitsstrom, vor und nach der Desorption beim Flüssigkeitsstrom, sowie beim Flüssigkeitsstrom vor und nach dem Wärmeübertrager, der Heizung und dem Kühler. Eine Auflistung der Temperaturmessstellen findet sich in Tabelle 1. In der Abbildung ist der mit CO_2 beladene Flüssigkeitsstrom rot dargestellt, der unbeladene blau. Der Messgasstrom ist grün.

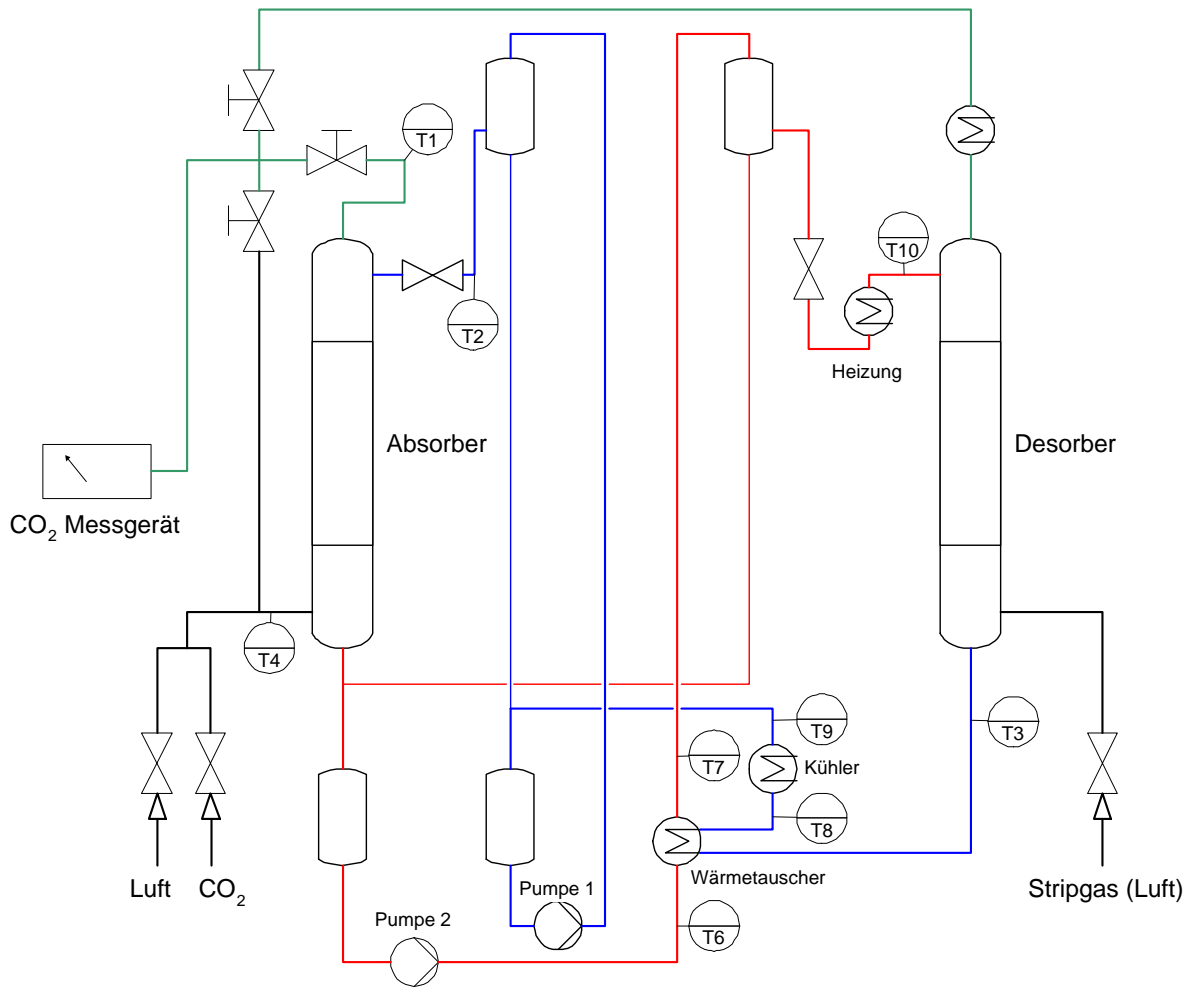


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Versuchsanlage

Kurbezeichnung	Beschreibung
T ₁	Austritt Absorber (Gasstrom)
T ₂	Eintritt Absorber
T ₃	Austritt Desorber
T ₄	Eintritt Absorber (Gasstrom)
T ₅	Austritt Absorber
T ₆	vor Wärmeübertrager
T ₇	nach Wärmeübertrager
T ₈	vor Kühler
T ₉	nach Kühler
T ₁₀	Thermostat vor Desorber

Tabelle 1: Temperaturmessstellen im Waschwasser (wenn nicht anders angegeben)

1.5 Durchführung

Nach den Vorgaben des Assistenten wird der Einfluss der Desorptionstemperatur und des Stripgasstromes auf die Effizienz der Desorption und dann der Einfluss verschiedener Zuluftströme

bei konstanten CO_2 -Gehalt untersucht. Hierbei wird jeweils ein definierter Waschflüssigkeits-, Stripgas-, CO_2 - und Zuluftstrom, sowie eine bestimmte Desorptionstemperatur eingestellt. Dann werden jeweils die CO_2 -Beladungen der Zuluft, der Abluft nach der Absorption, sowie der Gehalt an CO_2 des Stripgases nach der Desorption ermittelt. Auch werden die Temperaturen von Waschflüssigkeit und Gas protokolliert.

Zur Indizierung und Kennzeichnung sei angemerkt:

- α steht für Einstrom
- ω steht für Ausstrom
- G, y und Y stehen für Gasphase
- L, x und X stehen für Flüssigphase (liquid)
- ' steht für Desorber (ohne Hochkomma: Absorber)

2 Messreihen

2.1 Versuchsbedingungen

Nach den Vorgaben des Assistenten wurden folgende Versuchsreihen durchgeführt.

		Absorptionsversuch			Desorptionsversuch			
Volumenströme		1	2	3	1	2	3	4
Luft	l/h	50	80	100	80			
CO_2	l/h	4,1	6,7	8,3	8			
Waschwasser	l/h	80						
Stripgas	l/h	140			50	120	120	50
Desorptionstemperatur	$^{\circ}C$	40			20		30	

Tabelle 2: Versuchsbedingungen

2.2 Versuchsergebnisse

Folgende Ergebnisse wurden abgelesen:

		Absorptionsversuch			Desorptionsversuch			
CO_2 -Gehalte		1	2	3	1	2	3	4
Rohgas	<i>Vol - %</i>	10,3	11	10	12,3	12	12	12,4
Absorption, aus	<i>Vol - %</i>	1	6,2	6,3	0,5	6	6	6,7
Desorption, aus	<i>Vol - %</i>	3,3	3,5	3	4	4	4,3	7
T_1	$^{\circ}C$	20	20,5	21	19,8	19,8	19,8	20
T_2	$^{\circ}C$	20,3	22	22	17	17	19	19
T_3	$^{\circ}C$	38	41	41	24	23	32	32
T_4	$^{\circ}C$	19	19	19	19	19	19	19
T_5	$^{\circ}C$	20	21	20,5	18,5	18,5	19	19,5
T_6	$^{\circ}C$	22	24	24	18	17	21	20
T_7	$^{\circ}C$	27	28	28	19	19	23	24
T_8	$^{\circ}C$	32	35	35	21	21	28	28
T_9	$^{\circ}C$	22	23	24	16	16	19	20
T_{10}	$^{\circ}C$	39,5	41	40	20	20	30	30

Tabelle 3: Versuchsergebnisse

In der folgenden Grafik wird der Verlauf der Temperaturen in der Waschflüssigkeit aufgezeigt.

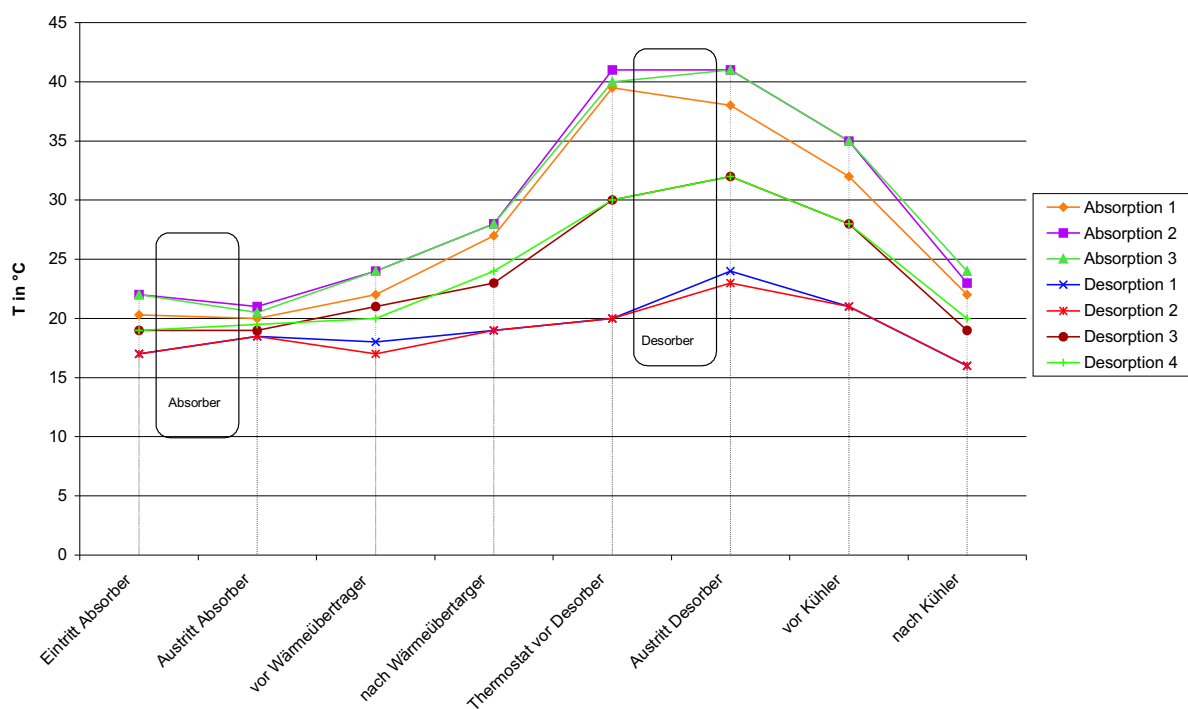


Abbildung 2: Temperaturverlauf

2.3 Stoffwerte

Nachfolgend aufgelistete Stoffwerte werden für die Berechnungen benötigt.

	ρ in $\frac{kg}{m^3}$	M in $\frac{kg}{mol}$	c_p in $\frac{kJ}{kg/K}$	Δh^{LV} in $\frac{kJ}{kg}$
Wasser	999 (20 °C) 988 (50 °C)	0,018	4,181	2257
Luft	1,29 (Norm)	0,02896	1,005	197
CO_2	1,97 (Norm)	0,044	0,846	574

Tabelle 4: Stoffwerte (teilweise aus dem VDI-Wärmeatlas entnommen)

3 Ergebnisse

3.1 Ermittlung der Gleichgewichtslinie

Um den Henry-Koeffizienten und damit die Gleichgewichtskurve für die jeweiligen Versuche zu ermitteln, wurden zunächst die Gleichgewichtsbeladungen von CO_2 in Wasser (S. 31 Versuchsskript) linear mit der Formel

$$X = X_0 \cdot \frac{p_{CO_2}}{p_0} \quad (1)$$

umgerechnet. Für p_0 wurde der zu diesem Zeitpunkt herrschende Luftdruck im Labor verwendet. Für p_{CO_2} wurde der Mittelwert der CO_2 -Partialdrücke vom Kopf und vom Fuß der Kolonne für den jeweiligen Versuch benutzt. Die Partialdrücke wurden folgendermaßen ermittelt:

$$p_{CO_2} = y_{CO_2} \cdot p_0 \quad (2)$$

mit

$$y_{CO_2} = \frac{Y_{CO_2}}{1 + Y_{CO_2}} \quad (3)$$

Die notwendigen Molbeladungen Y_{CO_2} wurden aus den Volumenbeladungen nach folgender Formel berechnet:

$$Y_{molCO_2} = Y_{VolCO_2} \cdot \frac{M_{H_2O} \cdot \rho_{CO_2}}{M_{CO_2} \cdot \rho_{H_2O}} \quad (4)$$

mit

$$Y_{VolCO_2} = \frac{Vol - \%}{100 - Vol\%} \quad (5)$$

Hierbei stellt Vol-% den jeweils abgelesenen Wert am Messgerät dar. Für die Dichte von Wasser wurde der Wert $999 kg/m^3$ im Temperaturbereich von 0 bis $30^\circ C$ und $988 kg/m^3$ im Bereich von 40 bis $70^\circ C$ benutzt. Aus den so ermittelten Gleichgewichtsbeladungen X wird ein Polynom sechsten Grades approximiert, so dass man eine Funktion $X(T)$ erhält. Somit lässt sich für jeden Versuch die entsprechende Gleichgewichtsbeladung für die spezielle Temperatur und Druck ermitteln. Die Henry-Konstante ist definiert als:

$$H_{CO_2, H_2O} = \frac{p_{CO_2}}{x_{CO_2}} \quad (6)$$

wobei x_{CO_2} sich analog nach Formel 3 berechnen lässt. Die Y-Werte für die Gleichgewichtskurve werden ausgehend von

$$\frac{Y}{1 + Y} = \frac{H_{CO_2, H_2O}}{p_0} \cdot \frac{X}{1 + X} \quad (7)$$

nach folgender Formel berechnet:

$$Y = \frac{\frac{H_{CO_2, H_2O}}{p_0} \cdot \frac{X}{1 + X}}{1 - \frac{H_{CO_2, H_2O}}{p_0} \cdot \frac{X}{1 + X}} \quad (8)$$

3.2 Absorptionsversuche

Die Gesamtmolenströme können aus den gemessenen Volumenströmen über das ideale Gasgesetz bzw. über die Dichte ermittelt werden.

$$\dot{G} = \frac{p \cdot \dot{V}}{R \cdot T} \quad (9)$$

mit der allgemeinen Gaskonstante $R = 8,3144 \frac{J}{mol \cdot K}$ und dem Luftdruck im Labor $p = 98400 Pa$.

$$\dot{L} = \frac{\dot{V} \cdot \rho}{M} \quad (10)$$

mit der molaren Masse $M = 0,018 kg/mol$ für Wasser. Der Rohgasvolumenstrom setzt sich aus Luft- und CO_2 -Strom zusammen. Die CO_2 -Beladungen im Rohgas Y_α und Y_ω lassen sich anhand der Messdaten nach Gleichung 5 auf der vorherigen Seite umrechnen. Die CO_2 -Beladung im Washwasser X_α kann laut Angabe als null angesehen werden. X_ω wird hingegen durch die Stoffmengenbilanz ermittelt (siehe Kapitel 3.4 auf Seite 10). v lässt sich nach

$$v = \frac{\dot{L}}{\dot{G}} \quad (11)$$

berechnen. Die maximale CO_2 -Beladung im Washwasser $X_{\omega,max}$ kann, ebenso wie die Anzahl der theoretischen Trennstufen n_{th} und dem minimalen Lösungsmittelverhältnis v_{min} , aus dem Beladungsdiagrammen ermittelt werden.

		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
\dot{L}	mol/s	1,23		
\dot{G}	mol/s	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-4}$	$12,1 \cdot 10^{-4}$
Y_α	mol/mol	0,115	0,124	0,112
Y_ω	mol/mol	0,010	0,066	0,068
X_α	mol/mol	0		
X_ω	mol/mol	$4,64 \cdot 10^{-5}$	$4,04 \cdot 10^{-5}$	$3,89 \cdot 10^{-5}$
v		2025,92	1264,16	1012,02
v_{min}		1490,35	796,53	663,51
$X_{\omega,max}$	mol/mol	$7,06 \cdot 10^{-5}$	$7,26 \cdot 10^{-5}$	$6,65 \cdot 10^{-5}$
n_{th}		4	1	1
H_{CO_2,H_2O}	bar	1440,32	1497,70	1486,97

Tabelle 5: Ergebnisse der Absorptionsversuche

Aus diesen Daten erhält man nachfolgende Beladungsdiagramme.

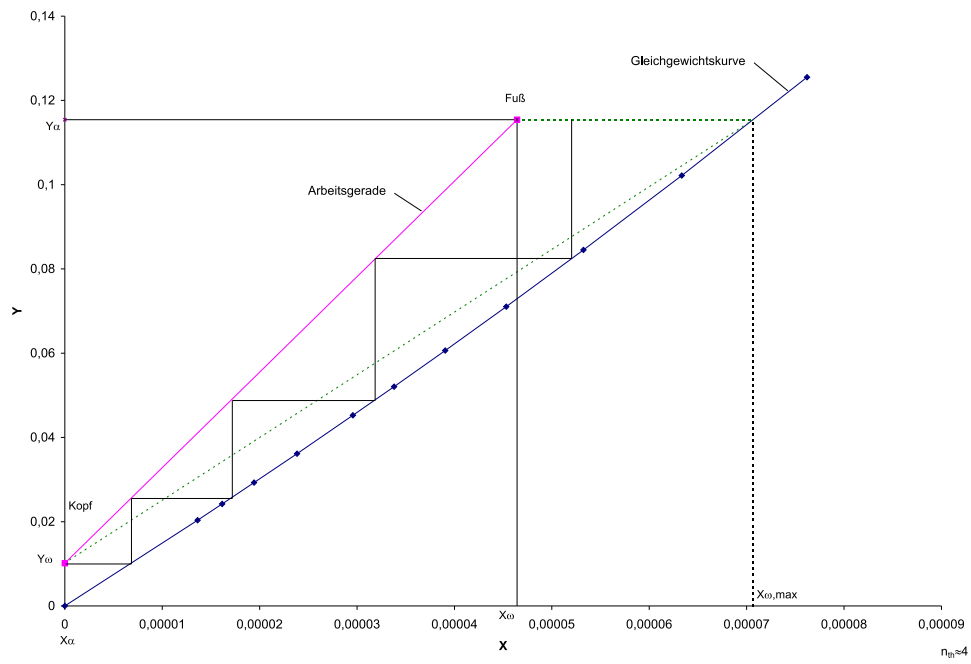


Abbildung 3: Beladungsdiagramm Absorptionsversuch 1

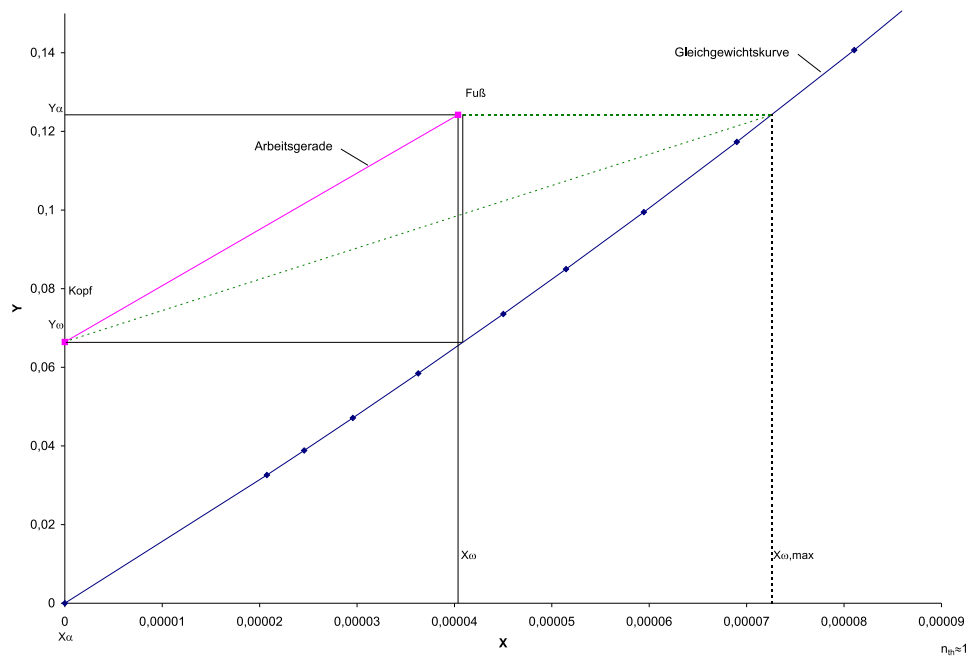


Abbildung 4: Beladungsdiagramm Absorptionsversuch 2

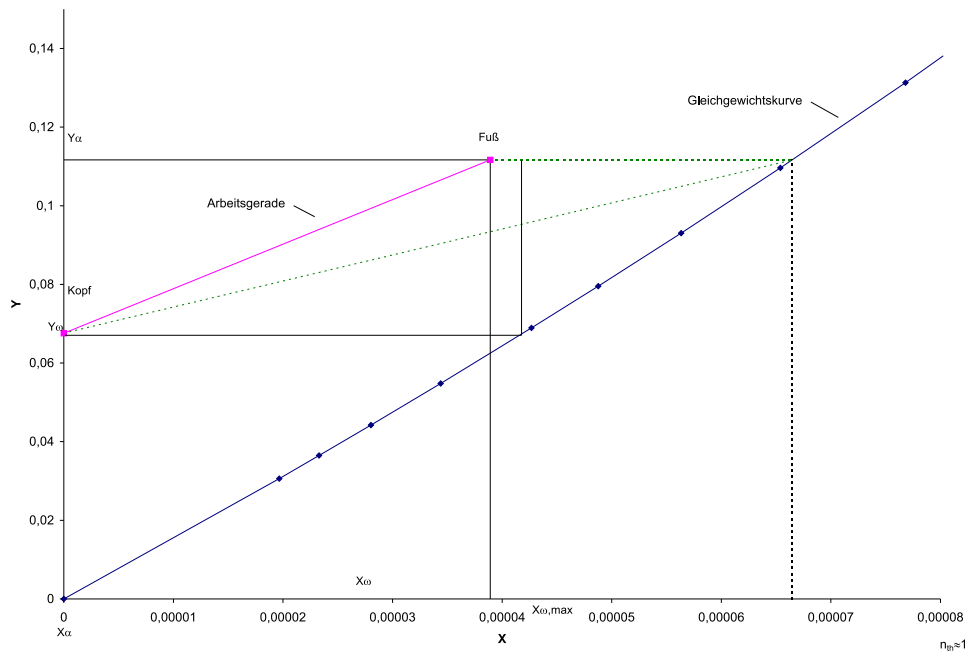


Abbildung 5: Beladungsdiagramm Absorptionsversuch 3

3.3 Desorptionsversuche

Die Stoffmengenströme werden analog Gleichung 9 und 10 aus den Versuchsbedingungen (vgl. Tabelle 2) berechnet. Die CO_2 -Beladung im Stripgasstrom G' wird vor der Desorption zu $Y_\alpha = 0$ angenommen und nach der Desorption als Y_ω aus den Messdaten berechnet. Die CO_2 -Beladung X_α im Washwasserstrom L' vor der Desorption entspricht der Beladung nach der Absorption und wird über die Stoffmengenbilanz berechnet (siehe Kapitel 3.4.1). Die CO_2 -Beladungen im Washwasser nach der Desorption X_ω erhält man ebenfalls aus der Stoffmengenbilanz (siehe Kapitel 3.4.2).

Die maximale CO_2 -Beladung im Washwasser $X_{\omega,max}$ kann, ebenso wie die Anzahl der theoretischen Trennstufen n_{th} , aus den Beladungsdiagrammen ermittelt werden. Das Lösungsmittelverhältnis entspricht wieder Gleichung ??, der Henry-Koeffizient Gleichung 6.

		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
L'	mol/s	1,2333			
G'	mol/s	0,00056	0,00135	0,00135	0,00056
Y'_α	mol/mol	0			
Y'_ω	mol/mol	0,04	0,04	0,05	0,08
X'_α	mol/mol	$9,53 \cdot 10^{-5}$	$5,11 \cdot 10^{-5}$	$5,11 \cdot 10^{-5}$	$4,89 \cdot 10^{-5}$
X'_ω	mol/mol	$7,63 \cdot 10^{-5}$	$5,50 \cdot 10^{-6}$	$1,93 \cdot 10^{-6}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$
$X'_{\omega,max}$	mol/mol	$2,61 \cdot 10^{-5}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$	$2,37 \cdot 10^{-5}$	$3,61 \cdot 10^{-5}$
n_{th}		1	3	4	3
v'		2025,92	913,35	913,35	2192,04
H_{CO_2,H_2O}	bar	1519,11	1497,61	1926,82	1926,83

Tabelle 6: Ergebnisse der Desorptionsversuche

Aus diesen Daten erhält man nachfolgende Beladungsdiagramme.

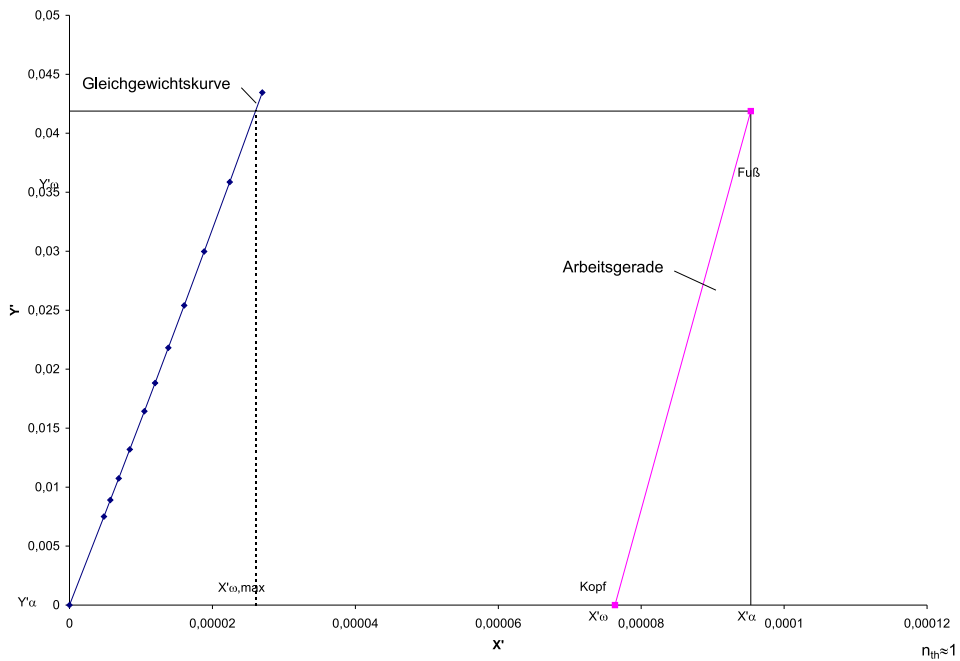


Abbildung 6: Beladungsdiagramm Desorptionsversuch 1

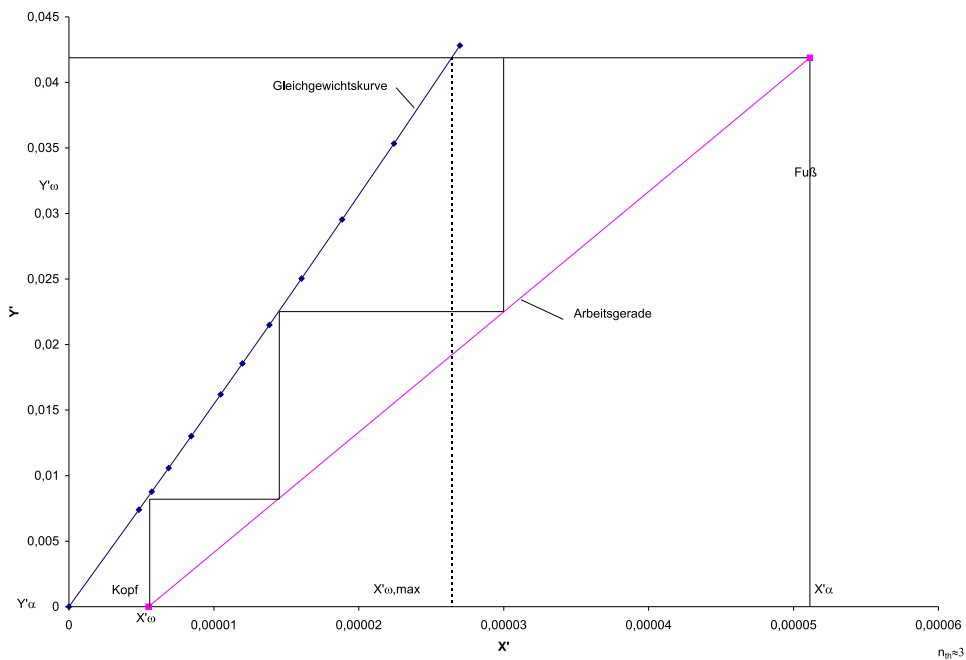


Abbildung 7: Beladungsdiagramm Desorptionsversuch 2

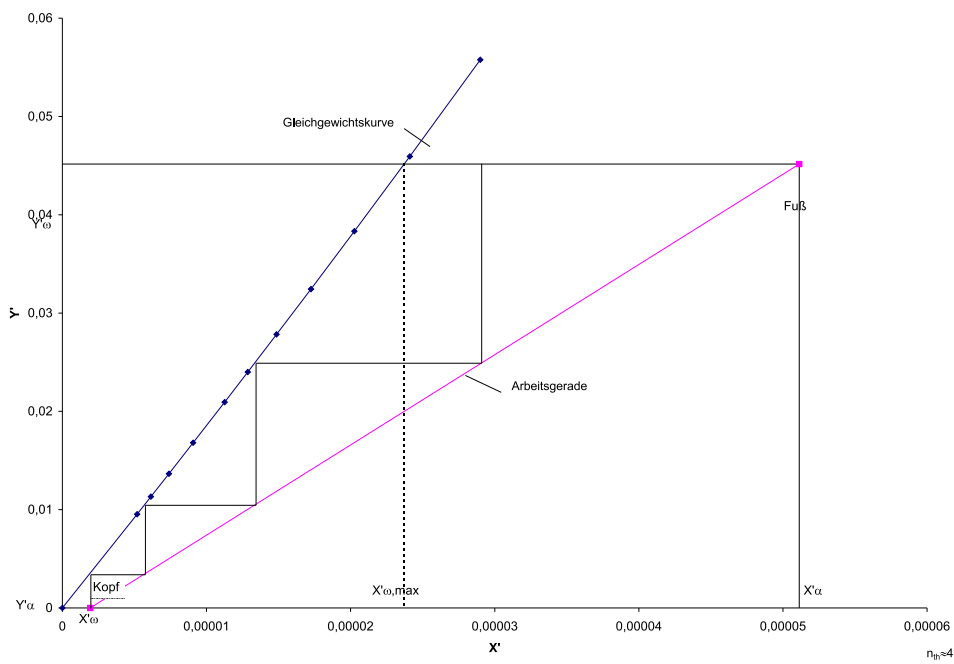


Abbildung 8: Beladungsdiagramm Desorptionsversuch 3

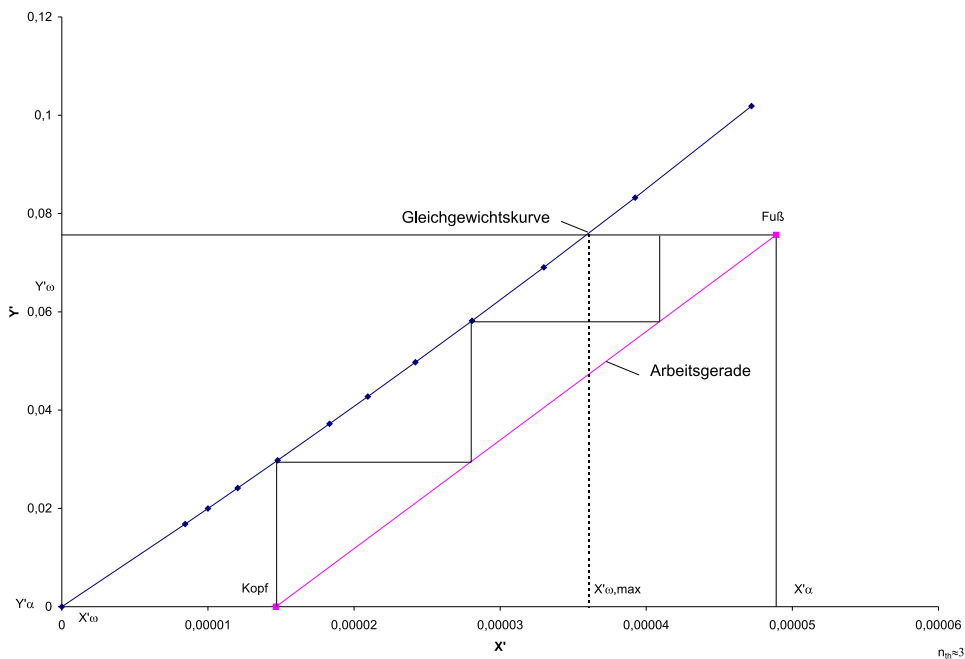


Abbildung 9: Beladungsdiagramm Desorptionsversuch 4

3.4 Stoffmengenbilanz

Beim Aufstellen der Stoffmengenbilanz für CO_2 betrachtet man die in das System ein- und ausfließenden Stoffströme. Diese ergeben sich aus den Gesamtstromen $\dot{G}_{\alpha/\omega}$ und $\dot{L}_{\alpha/\omega}$ multipliziert mit den *Molenbrüchen* x (Gasphase) und y (Flüssigphase) für CO_2 . Daraus folgt

die Bilanzgleichung:

$$\dot{G}_\alpha \cdot y_\alpha + \dot{L}_\alpha \cdot x_\alpha = \dot{G}_\omega \cdot y_\omega + \dot{L}_\omega \cdot x_\omega \quad (12)$$

\dot{G}_ω und x_ω sind unbekannte Größen. \dot{G}_ω ergibt sich aus dem einfließenden Molenstrom abzüglich dem übergehenden Molenstrom:

$$\dot{G}_\omega = \dot{G}_\alpha - (y_\alpha - y_\omega) \cdot \dot{G}_\alpha \quad (13)$$

Nun kann man nach dem gesuchten Molenbruch (CO_2 im Waschwasser) x_ω auflösen. Exemplarisch werden im Folgenden die Messwerte von *Absorption 1* für eine Bilanzierung verwendet.

3.4.1 Bilanz um Absorber

		in α	out ω
Molenstrom $\dot{G}_{\alpha/\omega}$	<i>mol/s</i>	0,00061	0,00055
Molenbruch $y_{\alpha/\omega}$		0,1035	0,0101
Molenstrom $\dot{L}_{\alpha/\omega}$	<i>mol/s</i>	1,23333	1,23339
Molenbruch $x_{\alpha/\omega}$		0,0000	$4,6426 \cdot 10^{-5}$
Molenstrom CO_2 gesamt (α/ω)	<i>mol/s</i>	$6,2791 \cdot 10^{-5}$	$6,2791 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 7: Stoffmengenbilanz um den Absorber

Als Beladung ausgedrückt beträgt die in Wasser gelöste CO_2 -Menge $X = 4,6428 \cdot 10^{-5}$. Man erkennt sehr gut, dass aufgrund des enormen Größenunterschiedes zwischen den Stoffmengen von CO_2 und Wasser der Unterschied zwischen Molenbruch und Beladung marginal wird.

3.4.2 Bilanz um Desorber

		in α	out ω
Molenstrom $\dot{G}'_{\alpha/\omega}$	<i>mol/s</i>	0,00157	0,00162
Molenbruch $y'_{\alpha/\omega}$		0,0000	0,0,0332
Molenstrom $\dot{L}'_{\alpha/\omega}$	<i>mol/s</i>	1,23339	1,23334
Molenbruch $x'_{\alpha/\omega}$		$4,6426 \cdot 10^{-5}$	$2,8020 \cdot 10^{-6}$
Molenstrom CO_2 gesamt (α/ω)	<i>mol/s</i>	$5,7261 \cdot 10^{-5}$	$5,7261 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 8: Stoffmengenbilanz um den Desorber

Als Beladung ausgedrückt beträgt die in Wasser gelöste CO_2 -Menge nach der Desorption $X = 2,8020 \cdot 10^{-6}$. Bei dieser Anzahl von Nachkommastellen ist zwischen Molenbruch Beladung kein Unterschied mehr zu erkennen.

3.4.3 Bilanz um Gesamtanlage

Da der Strom des Waschwassers im Kreis geführt wird gehen in die Bilanz um die Gesamtanlage nur Gasströme ein. Da diese und deren CO_2 -Molenbrüche bekannt sind, kann man den Gesamtein- und -ausstrom separat berechnen.

		in α	out ω
Molenstrom Absorber $\dot{G}_{\alpha/\omega}$	mol/s	0,00061	0,00055
Molenbruch Absorber $y_{\alpha/\omega}$		0,1035	0,0101
Molenstrom Desorber $\dot{G}'_{\alpha/\omega}$	mol/s	0,00157	0,00162
Molenbruch Desorber $x'_{\alpha/\omega}$		0,0000	0,0332
Molenstrom CO_2 gesamt (α/ω)	mol/s	$6,2791 \cdot 10^{-5}$	$5,9335 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 9: Stoffmengenbilanz um die Gesamtanlage

Es ergibt sich zwischen CO_2 -Ein- und -ausstrom eine Differenz von $3,4558 \cdot 10^{-6}$.

3.5 Enthalpiebilanz

Beim Aufstellen der Enthalpiebilanz für betrachtet man die in das System ein- und ausfließenden Wärmeströme. Diese ergeben sich aus den Gesamtmolenströmen multipliziert mit den spezifischen Enthalpien h . Die bei der Absorption freiwerdende Absorptionenthalpie Δh_{Ab} geht, multipliziert mit der absorbierten Stoffmenge, ebenfalls in die Enthalpiebilanz mit ein. Bei der hier vorliegenden Physisorption entspricht die Absorptionenthalpie der Verdampfungsenthalpie. Die spezifischen Enthalpien h_α und h_ω berechnen sich aus den spezifischen Wärmekapazitäten $c_{p,i}$ und der Temperatur.

$$h_{\alpha/\omega} = T \cdot \sum_{i=1}^n x_i c_{p,i} \quad (14)$$

Es folgt die Bilanzgleichung:

$$\dot{G}_\alpha \cdot h_\alpha + \dot{L}_\alpha \cdot h_\alpha + \dot{G}_\alpha \cdot (y_\alpha - y_\omega) \cdot \Delta h_{Ab} = \dot{G}_\omega \cdot h_\omega + \dot{L}_\omega \cdot h_\omega + \dot{Q}_K \quad (15)$$

Die Differenz zwischen ein- und ausströmenden Wärmen ergibt den durch Kühlung abgeführten Wärmestrom \dot{Q}_K .

Aufgrund der relativ geringen CO_2 -Beladungen in Gas und Waschwasser könnte dessen spezifische Enthalpie vernachlässigt werden. Im Hinblick auf die geringere Wärmekapazität von Luft und den geringeren Molenstrom der Gase könnte auch die Enthalpie der Gasphase komplett vernachlässigt werden. Da die Berechnungen in einer Tabellenkalkulation durchgeführt werden, ist der Aufwand, alle Komponenten mit einzubeziehen, unerheblich, so dass dennoch auf die möglichen Vereinfachungen verzichtet wird. Exemplarisch werden im Folgenden für die Bilanzierung die Messwerte von *Absorption 1* sowie nachfolgend aufgelistete Stoffwerte verwendet.

	spez. Wärmekapazität in $\frac{kJ}{mol \cdot K}$	Verdampfungsenthalpie in $\frac{kJ}{mol}$
Wasser	0,07526	40,626
Luft	0,02910	5,705
CO₂	0,03722	25,256

Tabelle 10: Stoffwerte für die Wärmebilanz

3.5.1 Bilanz um Absorber

		in α	out ω
Molenstrom $\dot{G}_{\alpha/\omega}$	mol/s	0,00061	0,00055
spez. Enthalpie $h_{\alpha/\omega}$	kJ/mol	8,748	8,556
Molenstrom $\dot{L}_{\alpha/\omega}$	mol/s	1,233	1,233
spez. Enthalpie $h_{\alpha/\omega}$	kJ/mol	22,084	22,061
$\dot{G}_{\alpha} \cdot (y_{\alpha} - y_{\omega}) \cdot \Delta h_{Ab}$	kJ/s	0,00143	
Wärmestrom gesamt $\dot{Q}_{\alpha/\omega}$	kJ/s	27,244	27,244
Wärmestrom \dot{Q}_K	kJ/s		0,02925

Tabelle 11: Enthalpiebilanz um den Absorber

Der Anteil der durch die Gasphase transportierten Enthalpie beträgt gerade 0,02 % der Enthalpie der flüssigen Phase.

3.5.2 Bilanz um Desorber

		in α	out ω
Molenstrom $\dot{G}'_{\alpha/\omega}$	mol/s	0,00157	0,00162
spez. Enthalpie $h_{\alpha/\omega}$	kJ/mol	8,503	8,582
Molenstrom $\dot{L}'_{\alpha/\omega}$	mol/s	1,233	1,233
spez. Enthalpie $h_{\alpha/\omega}$	kJ/mol	23,529	28,880
$\dot{G}'_{\alpha} \cdot (y_{\alpha} - y_{\omega}) \cdot \Delta h_{Ab}$	kJ/s	-0,00132	
Wärmestrom gesamt $\dot{Q}'_{\alpha/\omega}$	kJ/s	29,032	29,032
Wärmestrom \dot{Q}'_K	kJ/s		0,13797

Tabelle 12: Enthalpiebilanz um den Desorber

Der Anteil der durch die Gasphase transportierten Enthalpie beträgt gerade 0,05 % der Enthalpie der flüssigen Phase.

3.5.3 Bilanz um den Wärmeübertrager

Bei der Enthalpiebilanz um den Wärmeübertrager wird analog Gleichung 15 auf der vorherigen Seite vorgegangen, jedoch entfallen die Gasströme und die Absorptionswärme. Es werden nun die Flüssigkeitströme von Medium 1 (vom Absorber kommendes Waschwasser) und Medium 2 (vom Desorber kommendes Waschwasser) betrachtet.

$$\dot{L}_{\alpha,1} \cdot h_{\alpha,1} + \dot{L}_{\alpha,2} \cdot h_{\alpha,2} = \dot{L}_{\omega,1} \cdot h_{\omega,1} + \dot{L}_{\omega,2} \cdot h_{\omega,2} + \dot{Q}_K \quad (16)$$

Die Differenz zwischen den übertragenen Wärmemengen ergibt wiederum den durch Kühlung abgeführten Wärmestrom \dot{Q}_K .

		in α	out ω
Molenstrom $\dot{L}_{\alpha/\omega,1}$	<i>mol/s</i>	1,233	1,233
spez. Enthalpie $h_{\alpha/\omega,1}$	<i>kJ/mol</i>	22,212	22,588
aufgenommene Wärme \dot{Q}_1	<i>kJ/s</i>	0,464	
Molenstrom $\dot{L}_{\alpha/\omega,2}$	<i>mol/s</i>	1,233	1,233
spez. Enthalpie $h_{\alpha/\omega,2}$	<i>kJ/mol</i>	23,416	22,965
abgegebene Wärme \dot{Q}_2	<i>kJ/s</i>		0,557
Wärmestrom \dot{Q}_K	<i>kJ/s</i>		0,093

Tabelle 13: Enthalpiebilanz um den Wärmeübertrager

3.5.4 Bilanz um die Heizung

Aus der Bilanz um die Heizung wird die, dem Waschwasser vor der Desorption elektrisch zugeführte, Wärme berechnet.

$$\dot{Q}_{\text{Heizung}} = \dot{L}_{\omega} \cdot h_{\omega} - \dot{L}_{\alpha} \cdot h_{\alpha} \quad (17)$$

		in α	out ω
Molenstrom $\dot{L}_{\alpha/\omega}$	<i>mol/s</i>	1,233	1,233
spez. Enthalpie $h_{\alpha/\omega}$	<i>kJ/mol</i>	22,588	23,529
aufgenommene Wärme \dot{Q}_{Heizung}	<i>kJ/s</i>	1,160	

Tabelle 14: Enthalpiebilanz um die Heizung

3.5.5 Bilanz um den Kühler

Aus der Bilanz um den Kühler wird die, dem Waschwasser nach der Desorption durch Wasserkühlung entzogene, Wärme berechnet.

$$\dot{Q}_{\text{Kuehlung}} = \dot{L}_{\alpha} \cdot h_{\alpha} - \dot{L}_{\omega} \cdot h_{\omega} \quad (18)$$

		in α	out ω
Molenstrom $\dot{L}_{\alpha/\omega}$	<i>mol/s</i>	1,233	1,233
spez. Enthalpie $h_{\alpha/\omega}$	<i>kJ/mol</i>	22,965	22,212
aufgenommene Wärme $\dot{Q}_{\text{Kuehlung}}$	<i>kJ/s</i>		0,928

Tabelle 15: Enthalpiebilanz um den Kühler

4 Diskussion der Ergebnisse und Fehlerbetrachtung

4.1 Absorption

Zu besseren Übersicht werden die relevanten Daten noch einmal dargestellt.

		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
\dot{L}	<i>mol/s</i>	1, 23		
\dot{G}	<i>mol/s</i>	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-4}$	$12,1 \cdot 10^{-4}$
Y_α	<i>mol/mol</i>	0,115	0,124	0,112
Y_ω	<i>mol/mol</i>	0,010	0,066	0,068
X_α	<i>mol/mol</i>	0		
X_ω	<i>mol/mol</i>	$4,64 \cdot 10^{-5}$	$4,04 \cdot 10^{-5}$	$3,89 \cdot 10^{-5}$
v		2025,92	1264,16	1012,02
v_{min}		1490,35	796,53	663,51
$X_{\omega,max}$	<i>mol/mol</i>	$7,06 \cdot 10^{-5}$	$7,26 \cdot 10^{-5}$	$6,65 \cdot 10^{-5}$
n_{th}		4	1	1
H_{CO_2,H_2O}	<i>bar</i>	1440,32	1497,70	1486,97
$H_{CO_2,H_2O,theor.}$	<i>bar</i>	1377,68	1425,84	1416,83
Abweichung von H_{CO_2,H_2O}	<i>%</i>	4,55	5,04	4,95

Tabelle 16: Ergebnisse der Absorptionsversuche

Insgesamt bleiben die jeweiligen Temperaturen bei den drei Versuchen in etwa konstant: Die Absorptionenthalpie ist effektiv so gering, dass sie keine wesentlichen Temperaturschwankungen hervorruft.

Bei der Beladung des gereinigten CO_2 -Stroms (Y_ω) tritt beim ersten Versuch eine deutliche Abweichung in Bezug auf die anderen beiden auf. Dies könnte auf den deutlichen Unterschied der Luftvolumenströme zwischen Versuch 1 und den beiden anderen zurückzuführen sein. Was die Beladung des Waschwasser nach der Absorption anbetrifft, ist zu sagen, dass diese bei einem grösser werdendem Luftstrom abnimmt.

Die berechneten Henry-Koeffizienten liegen in einem realistischen Größenbereich mit einer Abweichung vom Literaturwert von durchschnittlich 5%. Als Vergleich wurde die Datenbank unter <http://www.mpch-mainz.mpg.de/~sander/res/henry.html> (neueste Messung) verwendet. Bei den Versuchen 2 und 3 ist anzumerken, dass die Anzahl der theoretischen Stufen mit 1 zu gering ausfällt, was auf die Lage der Arbeitsgerade (ungewöhnlich kurz) zurückzuführen ist.

4.2 Desorption

Um den Erfolg der Desorption quantifizieren zu können wird eine selbst definierte Abreicherungsrate angewendet:

$$w = \frac{|\Delta X_{\alpha,\omega}|}{X_\alpha} \quad (19)$$

Zusammenfassend werden nun die Versuchsbedingungen und -ergebnisse der Desorptionsversuche aufgelistet.

		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4
\dot{L}'	mol/s	1,2333			
\dot{G}'	mol/s	0,00056	0,00135	0,00135	0,00056
Desorptionstemperatur	$^{\circ}C$	20		30	
Y'_{α}	mol/mol	0			
Y'_{ω}	mol/mol	0,04	0,04	0,05	0,08
X'_{α}	mol/mol	$9,53 \cdot 10^{-5}$	$5,11 \cdot 10^{-5}$	$5,11 \cdot 10^{-5}$	$4,89 \cdot 10^{-5}$
Abreicherungsrate w	%	19,94	82,25	96,22	70,02
X'_{ω}	mol/mol	$7,63 \cdot 10^{-5}$	$5,50 \cdot 10^{-6}$	$1,93 \cdot 10^{-6}$	$1,47 \cdot 10^{-5}$
$X'_{\omega,max}$	mol/mol	$2,61 \cdot 10^{-5}$	$2,65 \cdot 10^{-5}$	$2,37 \cdot 10^{-5}$	$3,61 \cdot 10^{-5}$
v'		2025,92	913,35	913,35	2192,04
n_{th}		1	3	4	3
H_{CO_2,H_2O}	bar	1519,11	1497,61	1926,82	1926,83
$H_{CO_2,H_2O,theor.}$	bar	1443,99	1425,84	1800,34	1800,34
Abweichung von H_{CO_2,H_2O}	%	5,20	5,03	7,03	7,03

Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse

Betrachtet man die Beladungsdiagramme, so fällt auf, dass bei Desorption 1 die Arbeitsgerade außergewöhnlich weit rechts liegt. Dies wird dadurch hervorgerufen, dass die CO_2 -Beladung im Washwasser ungewöhnlich groß ist und zudem nur eine CO_2 -Abreicherung von 19,94 % erreicht wird.

Die Beladungsdiagramm der Desorptionsversuche 2 bis 4 entsprechen hingegen, dem nach der Literatur zu erwartenden Aussehen. Tendentiell wird sehr deutlich, dass Effizienz der Desorption mit steigender Temperatur und abnehmendem Lösungsmittelverhältnis zunimmt. Lösungsmittelverhältnis bedeutet hier das Verhältnis von Washmittelstrom zu Stripgasstrom - deswegen also umgekehrte Proportionalität zwischen Lösungsmittelverhältnis und Abreicherungsrate. Wobei in unseren Versuchen die Lösungsmittelmenge im Vergleich zur Temperatur einen größeren Einfluss auf die Abreicherungsrate hat.

In Bezug auf die Anzahl der theoretischen Trennstufen n_{th} stellt man fest, dass diese mit Verbesserung der Desorptionseffizienz zunimmt.

Die Henry-Koeffizienten entsprechen weitgehend den nach der Literatur zu erwartenden Werten und erreichen mit einer Abweichung von durchschnittlich 6 % eine hinnehmbare Genauigkeit.

4.3 Stoffmengenbilanz

Die aus der Stoffmengenbilanz ermittelte CO_2 -Beladung im Washwasser nach der Absorption beträgt $X_{real} = 4,6428 \cdot 10^{-5}$. Die nach dem Gleichgewichtsgesetzen bei dem Partialdruck $p_{CO_2} = 0,05585 bar$ und der Temperatur $T = 20,15^{\circ}C$ maximal erreichbare CO_2 -Beladung beträgt $X_{max} = 7,0630 \cdot 10^{-5}$. Das heißt es werden 65,73 % der maximal möglichen Beladung erreicht.

Betrachtet man die CO_2 -Beladung im Rohgas ($Y_{\alpha} = 0,1154$) und nach der Absorption ($Y_{\omega} = 0,0102$), so folgt daraus eine Reinigungsleistung 91,20 %. Die ermittelte CO_2 -Beladung im Washwasser nach der Desorption beträgt $X_{\omega} = 2,8020 \cdot 10^{-6}$. Im Vergleich zur Beladung vor der Desorption $X_{\alpha} = 4,6428 \cdot 10^{-5}$ bedeutet dies eine Waschleistung von 93,96 %.

Die CO_2 -Bilanz um die gesamte Anlage liefert einen, gegenüber dem Ausstrom, um $3,4558 \cdot 10^{-6} mol/s$ höheren Einstrom. Dies könnte neben ungenauen Messwerten auf einen (noch) nicht vollkommen stationären Betriebszustand hindeuten. D.h. vom Washwasser wird mehr CO_2 ab-

sorbiert als desorbiert.

4.4 Enthalpiebilanz

Bei der Enthalpiebilanz um den Absorber beträgt der ermittelte Wärmeverlust $\dot{Q}_K = 0,02925 \text{ kJ/s}$, beim Desorber $\dot{Q}_K = 0,13797 \text{ kJ/s}$. Die erhöhte Wärmeabgabe beim Desorber ist auf dessen höhere Temperatur von $39,5^\circ\text{C}$ zurückzuführen.

Im Wärmeübertrager wird der, zur Desorption führende, Waschwasserstrom vom bereits desorbierten Waschwasser von 22°C auf 27°C erwärmt. Es nimmt dabei eine Wärme von $\Delta\dot{Q}_{\text{Aufnahme}} = 0,464 \text{ kJ/s}$ auf. Das desorbierte Waschwasser kühlt sich von 38°C auf 32°C ab und gibt dabei eine Wärme von $\Delta\dot{Q}_{\text{Abgabe}} = 0,557 \text{ kJ/s}$ ab. Der rechnerische Differenzbetrag von $0,093 \text{ kJ/s}$ wird vermutlich als Wärmeverlust Q_K an die Umgebung abgegeben.

In der anschließenden Heizapparatur wird das vorgewärmte Waschwasser von 27°C auf die Desorptionstemperatur von $39,5^\circ\text{C}$ gebracht. Dabei beträgt die elektrisch zugeführte Wärmemenge $\dot{Q}_{\text{Heizung}} = 1,160 \text{ kJ/s}$.

Das vom Wärmeübertrager kommende, desorbierte Waschwasser wird in einem anschließenden Wasserkühler weiter von 32°C auf 22°C abgekühlt. Dabei wird eine Wärme von $\dot{Q}_{\text{Kuehlung}} = 0,928 \text{ kJ/s}$ ans Kühlwasser abgegeben.

4.5 Fehlerquellen

- Es wird die grundlegende vereinfachende Annahmen getroffen, dass die CO_2 -Beladung im Waschwasser $X_\alpha = 0$ entspricht; rechnerisch bleibt nach der Desorption aber eine Restbeladung von $X_\omega = 2,8020 \cdot 10^{-6}$ zurück. Dieses *vorbelastete* Waschwasser wird nun wieder der Absorption zugeführt.
- Der Druck der hausinternen Gasversorgung schwankt betriebsbedingt. Somit ist kein konstanter Volumenstrom von Rohgas und Stripgas gewährleistet.
- Der atmosphärische Kohlendioxidanteil in Roh- und Stripgas wurde nicht berücksichtigt. Auch dieser Anteil hat einen geringen Einfluss auf Absorption und Desorption.
- Das Thermostat erlaubte nur eine Einstellung im Bereich von etwa 1K .
- Teilweise sind die Thermometer an schlecht einsehbaren Stellen angebracht, was zu Paralaxe-Fehlern beim Ablesen führt.
- Das CO_2 -Messgerät braucht lange, um sich auf einen neuen Wert einzustellen. Hierbei ist unklar, ob immer ausreichend lange gewartet wurde.