

Vereinfachtes Modell zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Aminen und deren Mischungen bei der Entfernung von CO₂ aus Kraftwerksrauchgas

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Dr.-Ing.
von der Fakultät Bio- und Chemieingenieurwesen
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Vanessa Kubacz
aus
Bochum

Tag der mündlichen Prüfung: 15.04.2011
1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans Fahlenkamp
2. Gutachter: Prof. Dr. David W. Agar

Dortmund 2011

Berichte aus der Umwelttechnik

Vanessa Kubacz

**Vereinfachtes Modell zur Bewertung der
Leistungsfähigkeit von Aminen und deren
Mischungen bei der Entfernung von
CO₂ aus Kraftwerksrauchgas**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0326-0

ISSN 0945-1013

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vereinfachtes Modell zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Aminen und deren Mischungen bei der Entfernung von CO₂ aus Kraftwerksrauchgas

Vanessa Kubacz

Für meine Eltern Henryk und Domenica und meinen Bruder Matteo

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Fahlenkamp für die engagierte Betreuung, die konstruktiven Anregungen und stete Unterstützung während der gesamten Bearbeitungszeit.

Herrn Prof. Dr. David W. Agar möchte ich für die Übernahme der Zweitkorrektur danken.

Mein ganz besonderer Dank gilt der Hitachi Power Europe GmbH. Insbesondere danke ich Herrn Wolfgang Schreier, der diese Arbeit im Jahre 2008 erst ermöglicht hat.

Herrn Dr.-Ing. Klaus-Dieter Tigges danke ich für die Bereitstellung von Messergebnissen und die wohlwollende Unterstützung während der gesamten Durchführung der Arbeit.

Für die stete Hilfsbereitschaft und die gute und freundliche Zusammenarbeit möchte ich mich herzlichst bei Herrn Dr.-Ing. Arthur Heberle bedanken.

Für die Durchführung begleitender Rechnungen möchte ich mich ganz besonders bei Mike Bürgin und Tomasz Pakalinski bedanken.

Allen Angehörigen der CO₂-Task Force möchte ich für die letzten drei Jahre danken.

Ich danke meinen Eltern für liebevolle Unterstützung und die aufbauenden Gespräche. Meinem Bruder Matteo danke ich zudem herzlichst.

Zu guter Letzt danke ich Oliver Reichel, ohne den diese Arbeit nie zustande gekommen wäre.

Inhaltsangabe

Das Konzept der Aminwäsche zur Abscheidung von CO_2 aus Gasen mit Hilfe von Aminen hat sich in der Erdgasreinigung und Synthesegasaufbereitung bewährt. Aufgrund dessen wird das Verfahren auch zur Abscheidung von CO_2 aus Kraftwerksrauchgasen und damit als so genannter Post - Combustion Capture (PCC) Prozess diskutiert. Aufgrund der sich unterscheidenden Randbedingungen kann der bekannte Prozess nicht direkt adaptiert werden, vielmehr ist ein optimiertes Verfahren notwendig. Dabei bezieht sich die Optimierung meist auf die Bereitstellung eines verbesserten Waschmittels, das im Rahmen von Technikums- oder Pilotanlagen getestet wird. Für die Übertragung der Ergebnisse auf Demonstrations- oder großtechnische Anlagen sind leistungsfähige Softwaretools zur Prozesssimulation, wie zum Beispiel Aspen Plus® nötig. Aufgrund ihres generischen Charakters sind die Implementierung neuer Waschmittel und die damit verbundene Anpassung des Codes mit erheblichem Aufwand verbunden. Am Lehrstuhl für Umwelttechnik der TU Dortmund wird daher ein vereinfachtes, auf der chemischen und diffusiven Kinetik aufbauendes Modell entwickelt, das es ermöglicht, das Gleichgewichts – und Einschwingverhalten von wässrigen Aminlösungen und Aminblends auf kraftwerksseitig induzierte Einflüsse zu prognostizieren. Zu diesem Zweck werden die im allgemeinen Fall nicht – linearen Vorgänge strömungsmechanischer, stoff – und reaktionskinetischer Art soweit idealisiert, dass eine, in eine sinnvolle Anzahl von Horizontalsegmenten aufgeteilte Stoffaustauschkolonne abgebildet werden kann. Die Vorgänge innerhalb der Horizontalsegmente werden durch lineare, instationäre Differentialbilanzen beschrieben. Die analytische Lösung der Differentialgleichungen pro Segment enthält nicht nur gesetzte, aber auch freie Parameter für die Geometrie – und Stoffkonstanten, sondern auch Integrationskonstanten, die über einen Algorithmus an die Start – oder Endwerte der Kolonne numerisch angepasst werden können. Die gesamte Vorgehensweise zur Modellformulierung kann als analytisch – numerisch oder semi – numerisch bezeichnet werden. Die dieser Modellformulierung zu Grunde liegenden Differentialgleichung sind zwar vereinfacht, aber in Übereinstimmung mit bewährten verfahrenstechnischen Ansätzen noch so variabel, dass eine große Bandbreite an Aminen und Aminblends abgedeckt werden kann, die sonst auf Grund mangelnder oder ungenauer Stoffdaten nicht berücksichtigt werden könnten. Auf Basis von Versuchsergebnissen, die an der Technikumsanlage am Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) in Duisburg durchgeführt wurden, konnte das System für die primären Amine Monoethanolamin (MEA) und Diglycolamin (DGA) validiert werden. Versuche mit einer wässrigen MEA - Lösung an

der Pilotanlage in Esbjerg in Dänemark wurden für Validierungszwecke verwendet. Die stationären Ergebnisse des semi – numerischen Modells wurden zudem mit Resultaten der Software Aspen Plus® und Aspen Plus RateSep® verglichen. Ein Vergleich der dynamischen Untersuchungen mit Aspen Plus Dynamics® und dem entwickelten semi – numerischen Modell zeigt außerdem sehr gute Übereinstimmungen.

Abstract

Amine scrubbing systems are well – known processes for the removal of CO₂ in natural gas sweetening and in petrochemical industry. Therefore they are discussed as one option to remove CO₂ from flue gases generated by power plants. Due to different boundary conditions the process can not be adapted directly, an optimization is necessary. One option is the optimization of the solvent, which can afterwards be tested in lab – scale and pilot plants. For the design of demo or commercial size plants tools for process designing are mostly used. In order to convey the small scale measurements the software has to be adapted. Due to the generic character of the software this is linked to a high complexity. In order to simplify the theoretical screening of amines which is necessary to test their applicability in power plants the Laboratory for environmental technology at the TU Dortmund develops a rate - based model, which enables to simulate the behavior of aqueous amine solutions and amine blends on basis of reduced number of parameters. Therefore the reaction zone of a column is divided into sections, where the non – linear equations, which describe the mass transfer, can be idealized. and In this case the balances can be reduced to linear, transient equations. The analytical solution for each section includes parameters for the description of the mass transfer but also constants, which can be due to integration. The way of modeling can be described as analytical – numerical or as semi – numerical. Besides the steady-state examination the analytical solution can be used also to examine the impact of power-plant induced disturbances on the amine system. Due to the used linear balance equations the proposed procedure has to be validated for to review the possible discrepancy versus a non-linear balance equation system, numerically solved by means of Aspen Plus® or Aspen Plus Dynamics®. This validation was executed by means at different lab-scale and pilot-scale tests. Experimental data were supplied for

- Monoethanolamine (MEA) and Diglycolamine (DGA) by the Institute of Energy and Environmental Technology IUTA e.V at Duisburg, using a pressurized Lab scale plant,
- Monoethanolamine (MEA) by DONG Energy A/S, using the pressureless operated CASTOR pilot plant, which is installed at the ELSAM Power Station ‘Esbjerg Vaerket’ in Esbjerg/DK.

The simulated numbers and also the measurements can be reproduced by the model with high accuracy.

In a summarized scope this procedure allows

- a simplified evaluation of CO₂/Amine- test runs
- a quick prognosis of the impact of a power station operation on a CO₂/Amine scrubbing system
- integration of additional amines on a near time basis

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsangabe.....	I
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Das Oxyfuel - Verfahren	1
1.2 Das Pre – Combustion Verfahren.....	2
1.3 Das Post – Combustion CO ₂ Capturing – Verfahren	2
2 Stand der Technik.....	4
2.1 Nasschemische Absorption.....	5
2.1.1 Amine.....	7
2.1.1.1 Prozesse basierend auf Aminen.....	8
2.1.1.1.1 ABB Lummus.....	9
2.1.1.1.2 ADIP – und ADIP - X Prozess.....	9
2.1.1.1.3 Advanced Amines	9
2.1.1.1.4 aMDEA Prozess.....	10
2.1.1.1.5 Amine Guard FS.....	10
2.1.1.1.6 Fluor Econamine Prozess.....	10
2.1.1.1.7 Fluor Econamine FG Plus Prozess	11
2.1.1.1.8 Mitsubishi Heavy Industries.....	11
2.1.2 Das Ammoniak	12
2.1.3 Die Alkalikarbonate.....	14
2.2 Die Physikalische Absorption	15
2.2.1 Der FLEXSORB - Prozess	15
2.2.2 Das Fluor Waschmittel.....	16
2.2.3 Der Morphysorb - Prozess.....	16
2.2.4 Die Waschmittel Purisol und Rectisol.....	16
2.3 Die hybriden Waschmittel.....	17
2.4 Die Adsorption.....	17
2.4.1 Die Physikalische Adsorption.....	17
2.4.2 Carbonate Looping	17
2.4.3 Die Membranverfahren	18
2.4.3.1 Prozesse basierend auf membrangestützter Gastrennung.....	18
2.4.3.1.1 Die CYNARA Membrane Technology.....	18

2.4.3.1.2	Das Separex Membran System.....	18
2.4.3.1.3	Die MEDAL Membran Systeme	19
2.5	Das Frosting	19
2.6	Die Biologische CO ₂ – Abtrennung.....	19
2.7	Simulation der Absorption und Desorption von CO ₂	20
2.8	Zusammenfassung.....	20
3	Mathematische Modellbildung	22
3.1	Grundlagen zur Beschreibung der Absorption und Desorption	22
3.2	Mathematische Modellbildung.....	24
3.3	Bilanzen für die Beschreibung der Absorption einer Komponente.....	25
3.4	Laplace - Transformation	26
3.5	Anwendung der Laplace – Transformation auf das mathematische Modell	29
3.6	Erweiterung der Gleichung um induzierte Einflüsse.....	29
3.6.1	Besondere Funktionen zur Anwendung im Modell	29
3.6.1.1	Die Einheitssprung – Funktion	29
3.6.1.2	Die Rampen – Funktion	30
3.6.2	Sprungförmig – induzierte Einflüsse vom Kraftwerk	30
3.6.3	Rampenförmig induzierte Einflüsse vom Kraftwerk	31
3.7	Grenzwertbetrachtung für die Absorption	32
3.8	Die Desorption einer Komponente	34
3.9	Erweiterung der Gleichung um induzierte Einflüsse.....	35
3.9.1	Sprungförmig induzierte Einflüsse vom Kraftwerk	35
3.9.2	Rampenförmig induzierte Einflüsse vom Kraftwerk	36
3.10	Grenzwertbetrachtung für die Desorption	36
3.11	Erweiterung des Modells um konstitutive Gleichungen.....	38
3.12	Die Aminauswahl	39
3.13	Stoffwerte der ausgewählten Amine	41
3.14	Das System CO ₂ – Wasser	41
3.15	Die Reaktionen von CO ₂ mit Aminen.....	41
3.15.1	Das Monoethanolamin	42
3.15.2	Das Diglycolamin.....	43
3.15.3	Das Diethanolamin	43
3.15.4	Das Aminomethylpropanol	44
3.15.5	Das Methyldiethanolamin.....	45
3.15.6	Die Amingemische	46
3.15.6.1	Das MEA – MDEA - Gemisch	46
3.15.6.2	Das DEA – MDEA - Gemisch	46
3.16	Reaktionskinetiken der untersuchten Aminsyste me	47
3.16.1	Das System MEA – Wasser.....	49
3.16.2	Das System DGA – Wasser.....	49
3.16.3	Das System DEA – Wasser.....	50
3.16.4	Das System AMP – Wasser.....	51

3.16.5	Das System MDEA – Wasser	51
3.16.6	Die Amingemische	52
3.17	Konstitutive Gleichungen	53
3.17.1	Enhancement – Faktor	53
3.17.2	Stoffübergangswiderstände.....	54
3.17.2.1	Flüssigkeitsseitiger Stofftransportwiderstand	54
3.17.2.2	Gasseitiger Stofftransportwiderstand	54
3.18	Berücksichtigung der benötigten Stoffwerte.....	55
3.18.1	Dichte der Reinstoffe und der Lösung	55
3.18.2	Die dynamische Viskosität.....	57
3.18.3	Die kinematische Viskosität.....	57
3.18.4	Die Henry – Konstante	58
3.18.5	Die Diffusionskoeffizienten	60
4	Beschreibung des Berechnungsalgorithmus	62
4.1	Modellbildung	62
4.2	Beschreibung des Absorptionsprozesses.....	67
4.3	Beschreibung des Desorptionsprozesses.....	68
4.4	Beschreibung der dynamischen Vorgänge	69
4.5	Berechnungs algorithmus	70
4.6	Berechnung der einzelnen Stufen in den stationären Betriebspunkten	73
4.6.1	Berechnung der Stufe $j = 1$	73
4.6.2	Berechnung der Stufen $2 < j < n$	75
4.6.3	Abbruch der Iteration.....	77
4.7	Dynamische Berechnung der einzelnen Stufen	77
4.8	Berücksichtigung eines zusätzlichen Waschmittels	82
5	Validierung des semi – numerischen Modells	84
5.1	Validierung des semi – numerischen Modells mit Hilfe der IUTA Technikumsanlage	84
5.1.1	Pilotanlage IUTA e.V.....	84
5.1.2	Die durchgeführten Messreihen.....	86
5.1.2.1	Die Versuchsserie mit MEA.....	86
5.1.2.2	Die Versuchsserie mit DGA	90
5.2	Validierung des semi – numerischen Modells mit Hilfe der CASTOR Pilotanlage 93	
5.2.1	Die durchgeführten Messreihen.....	95
5.2.1.1	Kampagne 1: Variation der Waschmittelmenge.....	95
5.2.1.2	Kampagne 2: Variation des Desorberdrucks	98
5.3	Prozesssimulation und Validierung mit Hilfe von Aspen Plus®	100
5.3.1	Die Simulation mit Aspen Plus®	100
5.3.2	Die Simulation mit Aspen RateSep®	101

Inhaltsverzeichnis

5.3.2.1	Die Diskretisierung.....	101
5.3.2.2	Die Pilotanlage der Hitachi Power Europe GmbH	102
5.3.3	Prozesssimulation mit Hilfe von Aspen Plus®, Aspen RateSep® und Aspen Plus Dynamics®	104
5.3.3.1	Erstellung des zur Validierung verwendeten Modells.....	106
5.3.3.2	Vergleich der Simulationsergebnisse des Absorbers.....	108
5.3.3.3	Vergleich der Simulationsergebnisse des Desorbers.....	111
5.3.3.4	Vergleich der instationären Simulationsergebnisse der Software Aspen Plus Dynamics® und Vorhersagen des semi – numerischen Modells	112
5.3.3.4.1	Sprungförmig induzierte Änderung des Waschmittelstroms.....	112
5.3.3.4.2	Sprungförmig induzierte Änderung der Vorbeladung.....	115
5.3.3.4.3	Zusammenfassung der Simulation mit Aspen Plus®.....	116
5.3.3.4.4	Zusammenfassung der Validierung.....	117
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	121
7	Anhang.....	123
Beispiele für die Anwendung und Einsetzbarkeit des semi – numerischen Modells		123
7.1	Anwendungsbeispiel 1: Anlagengröße äquivalent zu 1 MW _{th}	123
7.2	Anwendungsbeispiel 2: Anlagengröße äquivalent zu 5 MW _{th}	126
7.2.1	Einfluss verschiedener Einbauten.....	126
7.2.2	Einfluss verschiedener Waschmittel.....	127
7.3	Anwendungsbeispiel 3: Anlagengröße äquivalent zu 250 MW _{el}	132
7.4	Anwendungsbeispiel 4: Anlagengröße äquivalent zu 800 MW _{el}	134
7.4.1	Änderung der Waschmittelmenge.....	135
Abkürzungen		137
Formelzeichen		138
Literaturverzeichnis.....		141
Anhang A.....		154

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Prozesse zum Einsatz als PCC Verfahrens.....	4
Abbildung 2-2 Beispiele für verschiedene nasschemische PCC – Verfahren	6
Abbildung 2-3 Prinzipielle Verfahrensübersicht über die nasschemischen Prozesse, die bei der PCC – Technologie zum Einsatz kommen können [Kohl 1997]	8
Abbildung 2-4 Prinzipieller Aufbau des Chilled – Ammonia Prozesses (Mountaineer Power Station).....	13
Abbildung 3-1 Absorption einer Komponente i in einer Stufe j.....	24
Abbildung 3-2 Lösungsgang bei der Laplace - Transformation	27
Abbildung 3-3 Konvention der Darstellung der Laplace – Transformation	27
Abbildung 3-4 Strukturformel von Monoethanolamin (MEA).....	42
Abbildung 3-5 Strukturformel von Diglycolamin (DGA)	43
Abbildung 3-6 Strukturformel von Diethanolamin (DEA)	44
Abbildung 3-7 Strukturformel von Aminoethylpropanol (AMP).....	44
Abbildung 3-8 Strukturformel von Methyldiethanolamin (MDEA)	45
Abbildung 4-1 Modell zur mathematischen Beschreibung der Absorption	63
Abbildung 4-2 Axialer Konzentrationsverlauf bei der Beschreibung durch ein Stufenmodell	64
Abbildung 4-3 Vorgang bei der Berechnung im Stufenmodell	66
Abbildung 4-4 Berechnungsalgorithmus des semi – numerischen Modells.....	70
Abbildung 4-5 Iterative Bestimmung der stationären Zustände $t=0$ und $t \rightarrow \infty$	71
Abbildung 4-6 Bestimmung des Stoffübergangs für a Aktualisierungspunkte	72
Abbildung 5-1 Pilotanlage IUTA e.V.	85
Abbildung 5-2 Einfluss des CO_2 – Gehalts des Rauchgases am Absorbereintritt auf den CO_2 – Gehalt des Rauchgases am Absorberaustritt bei einem Druck von 11,2 – 11,5 bar(a)	88

Abbildung 5-3 Einfluss des CO ₂ – Gehalts des Rauchgases am Absorbereintritt auf den CO ₂ – Gehalt des Rauchgases am Absorberaustritt bei einem Druck von 8,1 – 8,2 bar(a)	89
Abbildung 5-4 Einfluss des CO ₂ – Gehalts des Rauchgases am Absorbereintritt auf den CO ₂ – Gehalt des Rauchgases am Absorberaustritt bei einem Druck von 3,9 – 4,2 bar(a)	90
Abbildung 5-5 Einfluss des CO ₂ – Gehalts des Rauchgases am Absorbereintritt auf den CO ₂ – Gehalt des Rauchgases am Absorberaustritt bei einem konstanten Waschmittelstrom von 1000 l/h	92
Abbildung 5-6 Einfluss des CO ₂ – Gehalts des Rauchgases am Absorbereintritt auf den CO ₂ – Gehalt des Rauchgases am Absorberaustritt bei einem konstanten Waschmittelstrom von 1100 l/h	93
Abbildung 5-7 Einfluss der Rauchgasmenge auf den CO ₂ – Gehalt des Rauchgases am Absorberaustritt	97
Abbildung 5-8 Einfluss der Waschmittelmenge auf den CO ₂ – Gehalt des Rauchgases am Absorberaustritt	97
Abbildung 5-9 Einfluss der Reboilertemperatur auf die Beladung des Waschmittels am Desorberaustritt	99
Abbildung 5-10 Einfluss der spezifischen Reboilerleistung auf die Beladung des Waschmittels am Desorberaustritt	99
Abbildung 5-12 Aspen Dynamics® Modell	107
Abbildung 5-13 Vergleich zwischen der berechneten Beladung im CO ₂ – reichen und CO ₂ – armen Waschmittel	108
Abbildung 5-14 Berechneter Einfluss der Waschmittelmenge auf die Beladung des Waschmittels im Absorber	109
Abbildung 5-15 Berechneter Einfluss des CO ₂ – Gehalts im Rauchgas auf die Beladung des Waschmittels im Absorber	110
Abbildung 5-16 Berechneter Einfluss des Rauchgasstroms auf die Beladung des Waschmittels im Absorber	110

Abbildung 5-17 Berechneter Einfluss der Reboilerleistung auf die Beladung des Waschmittels am Desorberaustritt.....	111
Abbildung 5-18 Berechneter Einfluss der Waschmittelmenge auf die Beladung des Waschmittels am Desorberaustritt.....	112
Abbildung 5-19 Berechneter Einfluss eines Waschmittelsprungs von $17 \text{ m}^3/\text{h}$ auf $20 \text{ m}^3/\text{h}$ zum Zeitpunkt 1800s auf die Beladung des Waschmittels am Absorberaustritt	113
Abbildung 5-20 Berechneter Einfluss eines Waschmittelsprungs von $17 \text{ m}^3/\text{h}$ auf $23 \text{ m}^3/\text{h}$ zum Zeitpunkt 1800s auf die Beladung des Waschmittels am Absorberaustritt	114
Abbildung 5-21 Berechneter Einfluss eines Waschmittelsprungs von $17 \text{ m}^3/\text{h}$ auf $30 \text{ m}^3/\text{h}$ zum Zeitpunkt 1800s auf die Beladung des Waschmittels am Absorberaustritt	114
Abbildung 5-22 Berechneter Einfluss eines Sprungs der Vorbeladung des vom Desorber kommenden Waschmittels von $0,3 \text{ mol/mol}$ auf $0,2$ mol/mol zum Zeitpunkt 1800s auf die Beladung des Waschmittels am Absorberaustritt	115
Abbildung 5-23 Parity – Plot zur Darstellung der Abweichungen zwischen den Messwerten der Esbjerg – Pilotanlage und den Werten des semi- numerischen Modells.....	118
Abbildung 5-24 Parity – Plot zur Darstellung der Abweichungen zwischen den Messwerten der IUTA – Anlage und den Werten des semi- numerischen Modells.....	119
Abbildung 5-25 Parity – Plot zur Darstellung der Abweichungen zwischen den mit Aspen Plus RateSep® berechneten Werten und denen des semi- numerischen Modells.....	119
Abbildung 5-26 Parity – Plot zur Darstellung der Abweichungen zwischen den mit Aspen Plus® berechneten Werten und denen des semi-numerischen Modells.....	120

Abbildung 7-1 Berechneter Einfluss der Waschmittelmenge auf die CO ₂ – Abscheiderate im Absorber bzw. in den zwei Absorbern	124
Abbildung 7-2 Berechneter Einfluss des Amingehalts auf die CO ₂ – Abscheiderate im Absorber bzw. in den zwei Absorbern	125
Abbildung 7-3 Berechneter Einfluss der Vorbeladung auf die CO ₂ – Abscheiderate im Absorber bzw. in den zwei Absorbern	126
Abbildung 7-4 Berechneter Einfluss verschiedener Einbauten auf den CO ₂ - Abscheidegrad bei einer Höhe von 2m.....	127
Abbildung 7-5 Berechneter Einfluss der Waschmittelmenge auf die CO ₂ – Abscheiderate verschiedener binäre Gemische für S6/2 Fasern..	128
Abbildung 7-6 Berechneter Einfluss der Waschmittelmenge auf die CO ₂ – Abscheiderate verschiedener binärer Gemische für strukturierte Packungen Mellapak 250 Y.....	129
Abbildung 7-7 Berechneter Einfluss der Waschmittelmenge auf die CO ₂ – Abscheiderate verschiedener binäre Gemische für Füllkörper des Typs.....	130
Abbildung 7-8 Berechneter Einfluss der Waschmittelmenge auf die CO ₂ – Abscheiderate verschiedener tenärer Gemische für S6/2 Fasern	130
Abbildung 7-9 Berechneter Einfluss der Waschmittelmenge auf die CO ₂ – Abscheiderate verschiedener tenärer Gemische für strukturierte Packungen Mellapak 250 Y.....	131
Abbildung 7-10 Berechneter Einfluss der Waschmittelmenge auf die CO ₂ – Abscheiderate verschiedener binärer Gemische für Füllkörper des Typs.....	131
Abbildung 7-11 Berechnete Packungshöhe im Absorber bei Einsatz von 30 Gew. - %iger MEA Lösung.....	133
Abbildung 7-12 Berechnete Packungshöhe im Absorber bei Einsatz von 50 Gew. - %iger DGA Lösung.....	134

Abbildung 7-13 Berechneter Einfluss eines sich halbierenden Waschmittelstroms zum Zeitpunkt $t = 1800s$ auf die CO_2 – Beladung am Absorberaustritt.....	136
Abbildung 7-14 Berechneter Einfluss eines erhöhten Waschmittelstroms zum Zeitpunkt $t = 1800s$ auf die CO_2 – Beladung am Absorberaustritt	136

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Eigenschaften verschiedener Amine.....	7
Tabelle 2-2 Vertreter verschiedener Amingruppen	7
Tabelle 2-3 Lizenzierte Prozesse auf Ammoniakbasis	12
Tabelle 2-4 Prozesse zur CO ₂ - Abtrennung mit Kaliumkarbonat.....	15
Tabelle 2-5 Verschiedene FLEXSORB - Verfahren.....	16
Tabelle 3-1 Übersicht über die ausgewählten Amine	40
Tabelle 3-2 Verfügbare Messungen für MEA	49
Tabelle 3-3 Verfügbare Messungen für DGA.....	50
Tabelle 3-4 Verfügbare Messungen für DEA.....	50
Tabelle 3-5 Verfügbare Messungen für AMP	51
Tabelle 3-6 Verfügbare Messungen für MDEA.....	51
Tabelle 3-7 Verfügbare Messungen für das Gemisch MEA - MDEA.....	52
Tabelle 3-8 Verfügbare Messungen für das Gemisch MEA - MDEA.....	52
Tabelle 4-1 Vorgabe zur Beschreibung des Absorptionsprozesses	67
Tabelle 4-2 Vorgabe zur Beschreibung des Desorptionsprozess	69
Tabelle 4-3 Vorgaben für die Berechnung von instationären Vorgängen	69
Tabelle 4-4 Angaben zur Berücksichtigung eines zusätzlichen Waschmittels.....	82
Tabelle 5-1 Messwerte des Versuchstags 05.03.2008.....	86
Tabelle 5-2 Messwerte des Versuchstags 07.03.2008.....	87
Tabelle 5-3 Messwerte des Versuchstags 11.03.2008.....	87
Tabelle 5-4 Messwerte des Versuchstags 12.06.2008.....	90
Tabelle 5-5 Messwerte des Versuchstags 05.03.2008.....	91
Tabelle 5-6 Auslegungswerte der CASTOR - Pilotanlage	94
Tabelle 5-7 Übersicht über die CASTOR Pilotanlage [Knudsen 2008]	94
Tabelle 5-8 Zusammenfassung der Ergebnisse der ersten Messkampagne.....	96
Tabelle 5-9 Zusammenfassung der Ergebnisse der zweiten Messkampagne.....	98

Tabelle 5-10 Auslegungswerte der Pilotanlage der Hitachi Power Europe GmbH	104
Tabelle 5-11 Vergleich zwischen Aspen Plus® und dem semi-numerischen Modell	117
Tabelle 7-1 Hinterlegte Waschmittelkonzentrationen für die Parameterstudie	128
Tabelle 7-2 Auslegungsparameter	132
Tabelle 7-3 Ergebnisse des semi – numerischen Modells	132
Tabelle 7-4 Auslegungsparameter	135