

Effizienzoptimierte CO₂-Abtrennung in IGCC-Kraftwerken mittels Wassergas-Shift-Membranreaktoren

Sebastian Thomas Schiebahn

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK)
Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3)

Effizienzoptimierte CO₂-Abtrennung in IGCC-Kraftwerken mittels Wassergas- Shift-Membranreaktoren

Sebastian Thomas Schiebahn

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 213

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-89336-958-4


I Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung.....	III
Abstract	V
I Inhaltsverzeichnis	VII
II Abbildungsverzeichnis	XI
III Tabellenverzeichnis	XV
IV Abkürzungsverzeichnis.....	XVII
V Symbolverzeichnis.....	XIX
1 Einleitung und Aufgabenstellung.....	1
2 Kohlendioxidabtrennung in IGCC-Kraftwerken.....	7
2.1 Funktionsweise und Aufbau des IGCC-Prozesses	7
2.2 Demonstrationskraftwerke.....	9
2.3 Routen und Techniken zur Kohlendioxidabtrennung	10
2.3.1 Absorption in Flüssigkeiten	12
2.3.2 Kryogene Luftzerlegung	13
2.3.3 Adsorption an Festkörpern	13
2.3.4 Feststoffreaktion.....	14
2.3.5 Gastrennmembranen	15
3 Beschreibung der Kraftwerkskomponenten.....	17
3.1 Vergaser	17
3.1.1 Thermodynamische Grundlagen	17
3.1.2 Kennzahlen	21
3.1.3 Brennstoffzufuhr.....	22
3.1.4 Vergasungsprinzipien und Bauformen von Vergasern.....	24
3.1.5 Rohgaskühlung	25
3.2 Gasreinigung.....	30
3.2.1 Entstaubung	31
3.2.2 Entschwefelung.....	35
3.3 Gasturbine	40
3.4 Abhitzedampferzeuger und Dampfturbine	43
3.5 Luftzerlegungsanlage.....	46
3.6 Prozesseinheiten der CO ₂ -Abtrennung.....	47

3.6.1 CO-Konversion	47
3.6.2 Physikalische Wäsche zur CO ₂ -Abtrennung	48
3.6.3 Gastrennmembranen zur CO ₂ -Abtrennung und -Anreicherung	51
3.6.4 CO ₂ -Nachbehandlung	59
4 Literaturstudien zur CO ₂ -Abtrennung im IGCC	61
4.1 IGCC-Basiskonzepte	61
4.2 Post-Combustion Capture und Oxyfuel	62
4.3 Pre-Combustion Capture	63
4.3.1 Einflüsse des Wasserhaushaltes	63
4.3.2 Einflüsse der Prozesseinheiten	64
4.3.3 CO ₂ - und H ₂ -Membranen	65
4.3.4 CO ₂ - und H ₂ -selektive Wassergas-Shift-Membranreaktoren	65
4.4 Ergebnisse der Literaturstudie und Schlussfolgerungen	66
5 Berechnungsgrundlage und Simulationstools	69
5.1 Aspen Plus	71
5.2 Membranmodul in Aspen Custom Modeler	72
5.3 EBSILON Professional	76
6 Aufbau und Simulation des Referenz-IGCC	77
6.1 Aufbau des Referenz-IGCC-Kraftwerks	77
6.2 Simulationsergebnisse des Referenz-IGCC-Kraftwerks	80
7 Analyse der Wirkungsgradverluste	83
7.1 Aufbau und Simulation	83
7.2 Aufschlüsselung der Wirkungsgradverluste	86
7.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse und Schlussfolgerung	87
8 Konzeptentwicklung und Simulation	89
8.1 Integration des Wassergas-Shift-Membranreaktors	89
8.1.1 Positionierung der Membraneinheit	90
8.1.2 Vergleich H ₂ - gegenüber CO ₂ -selektiver Membran	91
8.1.3 Vergleich 3-End- gegenüber 4-End-Betriebsweise	93
8.1.4 Spülgasquellen für 4-End-Betrieb	96
8.1.5 Auswahl des Membranmaterials	99
8.2 Aufbau und Simulation des Basis-Konzepts mit WGS-MR	100
8.3 Prozessparametervariationen	104
8.3.1 Variation des H ₂ (max)-Abtrenngrades	104

8.3.2 Variation des Vergasungsdruckniveaus	105
8.3.3 Variation des H ₂ O/CO-Verhältnis im Membranreaktor	106
8.4 Einsatz von dampfleitenden Membranen.....	106
8.4.1 Dampfrezirkulation	107
8.4.2 Dampfüberbrückung.....	108
8.4.3 Simulationsergebnisse	108
8.5 Ergebnisse der Konzeptentwicklung und Simulation	110
9 Einsatz alternativer Membranmaterialien	113
9.1 Mikroporöse Membranen	113
9.1.1 Variation der H ₂ /CO ₂ -Selektivität	115
9.1.2 Variation der H ₂ /N ₂ -Selektivität.....	116
9.1.3 Variation der H ₂ /H ₂ O-Selektivität	117
9.2 Protonenleitende Membran	118
9.3 Ergebnisse des Einsatzes alternativer Membranen	120
10 Diskussion der Ergebnisse.....	121
10.1 Basiskonzepte ohne Membran	121
10.2 Zielgerichtete Konzeptfindung	121
10.3 Wirkungsgradpotential und technische Herausforderungen.....	123
10.4 Aussagen aus der Prozessparametervariation	124
10.5 Zusätzliche Optimierungspotentiale.....	124
10.5.1 Dampfrezirkulation nach dem WGS-MR.....	125
10.5.2 Dampfüberbrückung der Entschwefelung.....	125
10.6 Aussagen zu alternativen Membranmaterialien	125
10.6.1 Mikroporöse Membranen	126
10.6.2 Protonenleitende Membranen	127
11 Zusammenfassung	129
Literaturverzeichnis.....	133
Anhang	143
A Konstanten, Stoffgrößen und Umrechnungen	143
B Vergaser und typische Synthesegaszusammensetzungen	145
C Übersichtstabellen zur Literaturstudie.....	147
D Aspen Plus Grundoperatoren und Ersatzmodule	153
E Simulationsparameter	159
F Prozessschaltbilder der IGCC-Konzepte	165

G Stoffstromtabellen	177
H Einfluss des Brenngases auf den Gasturbinenprozess	191
I Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	193
I.1 Kapitalkosten	193
I.2 Betriebskosten	196
I.3 Brennstoff- und CO ₂ -Zertifikatskosten	197
I.4 Stromgestehungs- und CO ₂ -Vermeidungskosten	199



Die Abtrennung und Speicherung bzw. Wiederverwertung des im Abgas enthaltenen CO₂ aus fossil befeuerten Kraftwerken stellt eine Möglichkeit dar, den Ausstoß klimawirksamer Treibhausgase zu reduzieren. Als besonders aussichtsreich gilt die Integration von gastrennenden Membranreaktoren in Gas- und Dampfturbinen-Kombikraftwerke mit integrierter Kohlevergasung (IGCC = Integrated Gasification Combined Cycle), da gute Wirkungsgrade bei gleichzeitig hoher CO₂-Abtrennung ermöglicht werden. Gegenstand dieser Arbeit ist die Konzeptentwicklung und verfahrenstechnische Analyse von IGCC-Kraftwerken mit integrierten membranbasierten Abtrennverfahren. Der Fokus liegt auf der Nutzung von Synergieeffekten, um so den spezifischen energetischen Abtrennaufwand möglichst weit zu senken.

Autor:

Sebastian Schiebahn studierte an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH Aachen) Maschinenbau mit der Studienrichtung Verfahrenstechnik. Von 2009 bis 2012 beschäftigte er sich am Institut für Energie- und Klimaforschung – Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3) im Forschungszentrum Jülich mit der Konzeptentwicklung und Analyse von Verfahren zur CO₂-Abtrennung aus fossil befeuerten Kraftwerken, wobei der Fokus auf dem IGCC-Kraftwerkskonzept mit integrierten Gastrennmembranen lag. Der Inhalt dieses Buches wurde von der RWTH Aachen als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigt.

Institut:

Die Forschungsaufgaben des Instituts für Energie- und Klimaforschung – Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3) sind auf die Realisierung von Hoch- und Niedertemperaturbrennstoffzellen sowie von entsprechenden Stacks oder Systemen für stationäre oder mobile Anwendungen ausgerichtet. Ferner umfassen die verfahrens- und systemtechnischen Entwicklungen die Bereitstellung von Apparaten zur Brenngaserzeugung. Darüber hinaus zielt das IEK-3 auf die Bereitstellung von Anlagen zur großtechnischen Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyseuren mit Polymerelektrolytmembranen. Für eine tiefgehende Aufklärung von Strukturen und deren Wirkung sowie von energetischen Prozessketten werden die Arbeiten von physikalisch-chemischen Grundlagenuntersuchungen sowie systemanalytischen Studien der Energieverfahrenstechnik begleitet.