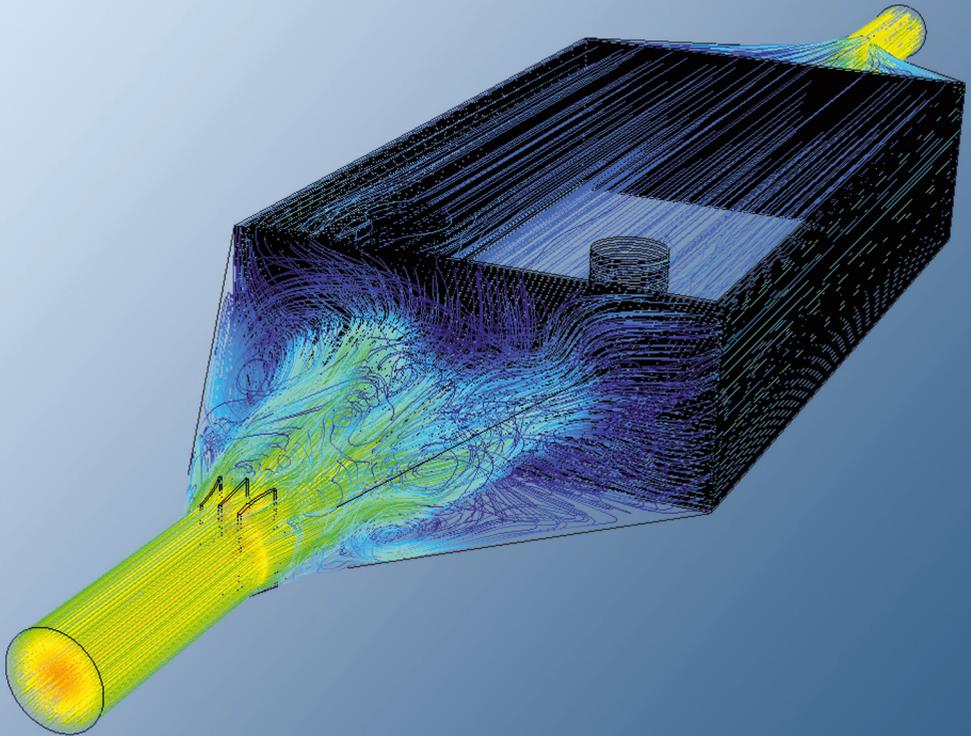


Konzeption von Membranmodulen zur effizienten Abtrennung von Kohlendioxid aus Gasgemischen

Sebastian Luhr



Energie & Umwelt /
Energy & Environment
Band / Volume 334
ISBN 978-3-95806-170-5

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

Konzeption von Membranmodulen zur effizienten Abtrennung von Kohlendioxid aus Gasgemischen

Sebastian Luhr

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

Band / Volume 334

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-170-5

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage und Problemstellung	2
1.2	Zielsetzung und Methodik der Arbeit	3
2	Grundlagen der membranbasierten CO₂-Abtrennung aus Kraftwerksrauchgas	5
2.1	Grundbegriffe der Membrantechnik	5
2.2	Bewertungskriterien für die membranbasierte CO ₂ -Abtrennung	6
2.3	Polyactive® als Gastrennmembran zur CO ₂ -Abtrennung	9
2.4	Membranmodule	13
2.4.1	Modulbauformen	14
2.4.2	Einfluss von Spacern auf die Triebkraft	18
2.4.3	Modulverschaltungen	22
2.5	Prozesstechnische Einbindung der membranbasierten CO ₂ -Abtrennung	24
2.5.1	Referenzkraftwerk Nordrhein-Westfalen	24
2.5.2	Randbedingungen zur Integration in die Prozesskette	26
2.5.3	Membranbasierter CO ₂ -Abtrennprozess des IEK-3	30
3	Gesamtmodell zur Modulauslegung	33
3.1	Methodik der Modulauslegung	33
3.2	Modellgrundlagen der Membrantechnik	35
3.2.1	Gaspermeation in Polymermembranen	35
3.2.2	Konzentrationspolarisation in Spacer-gefüllten Kanälen	40
3.2.3	Druckverlust im Membranmodul und Verteilsystem	43
3.3	Grundlagen fluiddynamischer Simulationen	45
3.3.1	Diskretisierung des Strömungsgebiets	45
3.3.2	Bilanzgleichungen der Fluidynamik	49
3.3.3	Turbulenzmodellierung	50
3.3.4	Poröse Körper als Ersatzmodell für Spacer-gefüllte Kanäle	52
3.4	Auslegung von Querschnittserweiterungen	54
3.5	Kostenmodell des membranbasierten Abtrennprozesses	58
3.5.1	Stromgestehungskosten des Kohlekraftwerks mit CO ₂ -Abtrennung	58
3.5.2	CO ₂ -Vermeidungskosten	67
4	Strömungsoptimierte Modulgestaltung des Prototyp-Moduls	69
4.1	Prototyp-Modul in Standardausführung	69
4.1.1	Prototyp-Aufbau des Gegenstrommoduls	69

4.1.2	Druckverlustmodellierung in ANSYS® FLUENT®	71
4.1.3	Simulation des Prototyp-Moduls in Standardausführung	74
4.2	Anströmung des Membranstapels	78
4.2.1	Strömungsverteilung im divergenten Kanal ohne und mit Gegendruck.....	79
4.2.2	Variation der Anströmgeschwindigkeit und des Feeddruckes	81
4.2.3	Einsatz von Leitblechen zur homogenen Anströmung des Membranstapels ...	84
4.3	Bypass-Strömung an der Membranverjüngung	88
4.4	Erkenntnisse über die optimierte Strömungsführung im Gegenstrommodul	91
5	Kostenbasierte Modulauslegung im Kraftwerksmaßstab.....	93
5.1	Freiheitsgrade und Restriktionen in der Modulauslegung	94
5.2	Referenzmodul im Kraftwerksmaßstab.....	97
5.2.1	Festlegung der Modulgeometrie des Referenzmoduls.....	97
5.2.2	Integration des Referenzmoduls in den CO ₂ -Abtrennprozess.....	98
5.2.3	CO ₂ -Vermeidungskosten mit integriertem Referenzmodul.....	103
5.3	Ermittlung der optimierten Eintrittsgeschwindigkeiten	108
5.3.1	Maximal tolerierbare Eintrittsgeschwindigkeit	108
5.3.2	Variation der Kanalhöhe	110
5.3.3	Optimierte Eintrittsgeschwindigkeiten im Abtrennprozess	113
5.3.4	Optimierte Eintrittsgeschwindigkeit und Kanalhöhe	115
5.4	Einteilung des Membranmoduls in Kompartimente.....	116
5.4.1	Kompartimente mit gleicher Länge	117
5.4.2	Kompartimente mit unterschiedlicher Länge.....	120
5.4.3	Schlussfolgerungen bezüglich der Einteilung in Kompartimente.....	121
5.5	Vergleich Gegenstrombetrieb und Gleichstrombetrieb	121
5.5.1	Vergleich der Abtrenngrade bei hohem Druckverhältnis	122
5.5.2	Wasserdampf als Spülgas im Permeat bei hohem Druckverhältnis	123
5.5.3	Partieller Gleichstrombetrieb in der zweiten Trennstufe.....	125
5.5.4	Schlussfolgerungen zur Strömungsführung.....	127
5.6	Bestimmung der Modulhöhe und Modulbreite	128
5.6.1	Abtrennperformance und CO ₂ -Vermeidungskosten.....	128
5.6.2	Packungsdichte und Anzahl der Membranmodule.....	130
5.6.3	Auslegung der Anschlussrohre.....	133
5.6.4	Auswahl der Modulhöhe und Modulbreite.....	137
5.7	Variation von Prozessparametern und Randbedingungen.....	138
5.7.1	Variation der Triebkraft in der ersten Trennstufe	138

5.7.2	Variation der Membraneigenschaften.....	143
5.7.3	Teillastverhalten des Abtrennprozesses.....	145
5.8	Ergebnisse der kostenbasierten Modulauslegung im Kraftwerksmaßstab	150
6	Diskussion der Ergebnisse.....	155
6.1	Maßnahmen zur optimierten Strömungsführung im Gegenstrommodul.....	155
6.2	Erkenntnisse aus der kostenbasierten Modulauslegung.....	159
6.3	Begründete Auswahl einer Modulgeometrie im Kraftwerksmaßstab	165
7	Zusammenfassung.....	167
8	Anhang.....	171
8.1	Abtrennrouten	171
8.2	Post-Combustion Capture Prozesse	174
8.3	Zusammensetzung der verschiedenen Steinkohlen	178
8.4	Umrechnung der Diffusionskoeffizienten	178
8.5	Matrixrechnung mit ungeradem Exponenten	180
8.6	Formelübersicht zur Bestimmung der Rohrreibungszahl	180
8.7	Lösungsprozess der Bilanzgleichungen in ANSYS® FLUENT®.....	182
8.8	Zeitliche Entwicklung des Chemical Engineering Plant Cost Index.....	184
8.9	Ergänzungen zu Kapitel 4	185
8.10	Ergänzungen zu Kapitel 5	191
	Abbildungsverzeichnis	203
	Tabellenverzeichnis	213
	Nomenklatur	215
	Literatur.....	223

**Energie & Umwelt /
Energy & Environment
Band / Volume 334
ISBN 978-3-95806-170-5**

