

# **Stofftransport durch Nanofiltrationsmembranen unter Berücksichtigung von Biofilmen**

Vom Fachbereich 13 Chemie und Chemietechnik  
der Universität Paderborn  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Naturwissenschaften  
**Dr. rer. nat.**

genehmigte Dissertation

von  
**Dirk Jakobs**  
aus  
Paderborn

Paderborn, Mai 2001

TC-Schriftenreihe

Band 9

**Dirk Jakobs**

**Stofftransport durch Nanofiltrationsmembranen  
unter Berücksichtigung von Biofilmen**

D 466 (Diss. Universität-GH Paderborn)

Shaker Verlag  
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Jakobs, Dirk:*

Stofftransport durch Nanofiltrationsmembranen unter Berücksichtigung  
von Biofilmen / Dirk Jakobs.

Aachen : Shaker, 2001

(TC-Schriftenreihe ; Bd. 9)

Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2001

ISBN 3-8265-9108-9

Copyright Shaker Verlag 2001

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9108-9

ISSN 1433-6499

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)



Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit von Januar 1997 bis April 2001 im Fachgebiet Technische Chemie und Chemische Verfahrenstechnik der Universität Paderborn angefertigt.

Referent: Prof. Dr. Ing. H.-J. Warnecke

Korreferent: PD Dr. rer. nat. D. Bothe

Tag der Abgabe: 02.05.2001

Tag der mündlichen Prüfung: 30.05.2001

Herrn Prof. Dr. Hans-Joachim Warnecke möchte ich für die interessante Themenstellung, die bei der Bearbeitung gewährten Freiräume sowie für die stete Diskussionsbereitschaft danken.

Herrn PD Dr. Dieter Bothe danke ich für die Übernahme des Korreferates, für die vielen fachlichen Diskussionen und für die intensive Betreuung auf dem Gebiet der mathematischen Modellierung

Frank Schubert danke ich für die in Rahmen seiner Diplomarbeit gewonnenen Erkenntnisse und für die gute Zusammenarbeit bei der gemeinsamen Nutzung der Laboranlage.

Ein besonderer Dank gilt meinen Bürokollegen Mike Bobert, Joachim Kleine und Susanne Thiemt für ihre freundschaftliche Zusammenarbeit. Die vielen Diskussionen, die oft über den Bereich der Abwasserreinigung und Membrantechnik hinausgingen, waren eine Bereicherung meiner Promotionszeit.

Weiterhin möchte ich auch allen anderen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Fachgebietes Technische Chemie und Chemische Verfahrenstechnik für die Schaffung einer angenehmen Arbeitsatmosphäre in der „Halle“ danken.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Problemstellung</b>	<b>1</b>
<b>2. Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1. Membranverfahren . . . . .	3
2.1.1. Druckgetriebene Membranverfahren . . . . .	4
2.1.2. Membranmodule . . . . .	7
2.2. Stofftransport in geladenen Membranen . . . . .	8
2.2.1. Grenzfläche Feed-Membran . . . . .	9
2.2.2. Transport durch die geladene Membran . . . . .	11
2.2.3. Grenzfläche Membran-Permeat . . . . .	14
2.2.4. Berücksichtigung der Aktivitätskoeffizienten . . . . .	15
2.3. Konzentrationspolarisation . . . . .	15
2.3.1. Ungeladene Stoffe . . . . .	17
2.3.2. Geladene Komponenten . . . . .	18
2.4. Biofilme . . . . .	19
2.4.1. Biofilme in Membransystemen . . . . .	22
2.4.2. Stofftransport durch Biofilme auf Membranen . . . . .	23
<b>3. Modellbildung</b>	<b>25</b>
3.1. Stationäres Modell . . . . .	25
3.1.1. Modellgleichungen . . . . .	27
3.1.2. Rechengang . . . . .	30
3.1.3. Analytische Approximation der Rückhalte . . . . .	32
3.2. Instationäres Modell . . . . .	36
3.2.1. Massenbilanzen . . . . .	37
3.2.2. Normierung und Randbedingungen . . . . .	39
3.2.3. Diskretisierung des Modells . . . . .	40

<b>4. Simulationsrechnungen</b>	<b>45</b>
4.1. Stationäres Modell für binäre Lösungen . . . . .	45
4.1.1. Stoffspezifische Parameter . . . . .	46
4.1.2. Systemspezifische Parameter . . . . .	51
4.2. Stationäres Modell für ternäre Lösungen . . . . .	57
4.2.1. Stoffspezifische Parameter . . . . .	58
4.2.2. Systemparameter . . . . .	61
4.3. Zeitabhängige Simulationsrechnungen . . . . .	65
4.3.1. Einfluss der Stützstellenanzahl auf die numerischen Berechnungen	66
4.3.2. Änderungen der Feedzusammensetzung . . . . .	67
4.3.3. Änderungen des Permeatflusses . . . . .	71
4.3.4. Übergang zu stationären Zuständen . . . . .	73
4.3.5. Berechnung der transmembranen Potentialdifferenz . . . . .	74
<b>5. Experimenteller Teil</b>	<b>77</b>
5.1. Aufbau der Versuchsanlage . . . . .	77
5.2. Stationäre Messungen . . . . .	79
5.2.1. Bestimmung der Membrankonstanten „A“ . . . . .	79
5.2.2. Nanofiltration binärer Lösungen . . . . .	80
5.2.3. Nanofiltration der ternären Lösung NaCl/Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . . . . .	87
5.3. Instationäre Messungen . . . . .	90
5.3.1. Änderung der Feedzusammensetzung . . . . .	92
5.3.2. Änderung des Permeatflusses . . . . .	93
<b>6. Zusammenfassung</b>	<b>95</b>
<b>A. Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>99</b>
<b>B. Standardparametersatz für die instationären Simulationen</b>	<b>103</b>
<b>C. Abschätzungen zum elektrochemischen Potential</b>	<b>105</b>
<b>D. Weitere Herleitungen zum instationären Modell</b>	<b>107</b>
<b>E. Literaturverzeichnis</b>	<b>109</b>