

Holger Thiess

**Modellierung von
Membrantrennverfahren am
Beispiel der Ultrafiltration in
der biotechnologischen und der
Pervaporation in der chemischen
Verfahrenstechnik**

**Modellierung von Membrantrennverfahren am
Beispiel der Ultrafiltration in der
biotechnologischen und der Pervaporation in
der chemischen Verfahrenstechnik**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Holger Thiess
aus Langenhagen

genehmigt von der Fakultät für Mathematik/Informatik und
Maschinenbau der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung
31.08.2018

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Prof. Dr.-Ing. Volker Wesling

Institut für Schweißtechnik und Trennende Fertigungsverfahren

Technische Universität Clausthal

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Jochen Strube

Institut für Thermische Verfahrenstechnik und Prozesstechnik

Technische Universität Clausthal

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Marcus Grünewald

Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Lehrstuhl für

Fluidverfahrenstechnik

Ruhr-Universität Bochum

Thermische Verfahrens- und Prozesstechnik

Holger Thiess

**Modellierung von Membrantrennverfahren
am Beispiel der Ultrafiltration in der
biotechnologischen und der Pervaporation
in der chemischen Verfahrenstechnik**

D 104 (Diss. TU Clausthal)

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: Clausthal, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6829-0

ISSN 2193-6560

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

„Eigentlich weiß man nur, wenn man wenig weiß;
mit dem Wissen wächst der Zweifel.“

- *Johann Wolfgang von Goethe*

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermische Verfahrens- und Prozesstechnik der Technischen Universität Clausthal. Allen Personen, die mich unterstützt und zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich sehr herzlich danken!

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Jochen Strube für die Möglichkeit am Lehrstuhl zu promovieren und in interessanten und herausfordernden Projekten zu wachsen und sich fachlich und persönlich weiterzuentwickeln. Er hatte stets ein offenes Ohr und die Diskussionen und Ratschläge sei es in seinem Büro, spontan in der Teeküche oder bei Seminaren waren ungemein hilfreich. Vielen Dank!

Danken möchte ich ebenfalls Prof. Dr. Volker Wesling für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Prof. Dr. Marcus Grünwald für die Übernahme der Begutachtung der Arbeit.

Bedanken möchte ich mich bei den technischen Mitarbeitern Wolfgang Otto und Roland Mecke, bei Martina Ketterer für ihre Unterstützung bei der Probenanalyse, Volker Strohmeyer für seinen tatkräftigen Einsatz an der Membranversuchsanlage und Frank Steinhäuser für sein unglaubliches Gespür bei der Wartung des Gaschromatographen. Dank gilt auch Dr. Reinhard Ditz für die fachlichen Diskussionen und Claudia Lacheta für Ihre Unterstützung bei sämtlichen administrativen und organisatorischen Fragen.

Diese Arbeit wäre ohne die Mitarbeit der Kollegen am ITVP so nicht möglich gewesen.

Dank gilt ebenfalls den wissenschaftlichen Mitarbeitern Dr. Simon Both, Dr. Holger Fröhlich und Dr. Christoph Helling für ihre Vorarbeit am Institut. Den wissenschaftlichen Mitarbeitern Dr. Steffen Zobel-Roos, Dr. Jan Schwellenbach, Martin Lucke, Thomas Kruse und Fabian Mestmäcker danke ich für die freundschaftliche Zusammenarbeit.

Bei Dr. Iraj Koudous, Dr. Tim Wellsandt, Benjamin Stanisch, Dr. Petra Gronemeyer, Dr. Maximilian Sixt, Leon Klepzig, Maximilian Huter, Martin Kornecki und Lukas Uhlenbrock möchte ich mich neben der sehr kollegialen Zusammenarbeit auch für die schöne Zeit in Clausthal bedanken. Hervorheben möchte ich dabei Axel Schmidt, der nicht nur als Masterand, sondern auch in unzähligen Diskussionen als wissenschaftlicher Mitarbeiter einen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat.

Des Weiteren möchte ich auch meinen Abschlussarbeitern Jonathan Töpfer, Dirk Meier und Thomas Peiner für ihren Beitrag zu dieser Arbeit danken.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern Katharina und Johann. Ohne ihr Verständnis, ihre Geduld, Ihre Unterstützung und ihre Förderung von Kindesbeinen an wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. Vielen Dank euch beiden!

Zu guter Letzt danke ich meiner Frau Jessica. Ich danke dir von Herzen für den notwendigen Ausgleich, den frischen Blick auf Dinge, das Zuhören, die Unterstützung „wenn es mal brannte“ und vor allem für deine Geduld. Dank dir war ich dem Wahnsinn nur nah.

Frankfurt a.M. im Juni 2019

Holger Thiess

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Motivation dieser Arbeit.....	1
1.2	Lösungsansatz	2
2	Stand der Technik.....	5
2.1	Membranen	5
2.2	Modultypen	9
2.3	Grundlagen und Klassifizierungen der Membrantrenntechnik	13
2.4	Ultrafiltration	20
2.5	Pervaporation	28
3	Transportansätze für Membrantrennverfahren.....	38
3.1	Stofftransport durch Membranen.....	38
3.1.1	Pore-Flow-Modell	43
3.1.2	Lösungs-Diffusions-Modell.....	45
3.1.3	Bestimmung der Permeanz bei Pervaporationen	58
3.2	Stoffaustausch an Membranen	60
3.2.1	Hydrodynamische Modelle an Membranoberflächen.....	62
3.2.2	Konzentrationspolarisation	64
3.2.3	Osmotic-Pressure-Modell.....	68
3.2.4	Bestimmungsmethoden für den Stofftransportkoeffizienten	70
3.3	Distributed-Plug-Flow-Modell	74
3.4	Impulstransport.....	75
3.4.1	Druckverlust in Leerkanälen.....	75
3.4.2	Druckverlust in Kanälen mit Gewebe oder hängendem Gewebe ..	78
3.5	Wärmetransport.....	79

3.5.1	Enthalpiebilanz Pervaporation	80
3.5.2	Temperaturpolarisation	81
4	Auslegungswerkzeug für Pervaporationen	83
4.1	Physiko-chemisches Modell	83
4.2	Modellparameterbestimmung und Validierung des Modells	87
4.2.1	Bestimmung von Stoff- und Moduldaten	87
4.2.2	Bestimmung von Transport- und Dispersionskoeffizienten	87
4.2.3	Bestimmung der Permeanz	87
4.2.4	Validierung des physiko-chemischen Pervaporationsmodells	94
4.3	Untersuchung des ternären Gemisches	99
4.4	Scale-up-Fähigkeit	103
5	Moduldesign für Ultrafiltrationen in biotechnologischen Anwendungen ..	109
5.1	Physiko-chemisches Modell	109
5.2	Charakteristische Länge	110
5.3	Stoffdaten	115
5.3.1	Dichte	115
5.3.2	Dynamische Viskosität	115
5.3.3	Molekularer Diffusionskoeffizient	116
5.3.4	Osmotischer Druck	116
5.4	Material und Methoden	117
5.4.1	Membranmodule	117
5.4.2	Versuchsaufbau und -durchführung	119
5.4.3	Experimentelle Fehleranalyse der Ultrafiltrationsversuche	120
5.5	Bestimmung des Stofftransportkoeffizienten	120
5.5.1	Sherwood-Korrelation	121

5.5.2	Stagnant-Film-Modell	122
5.5.3	Osmotic-Pressure-Modell	122
5.5.4	Vergleich und Methodenauswahl	124
5.6	Druckverlust.....	129
5.7	Statistische Modellierung und Ranking der Module	133
5.8	Simulation.....	142
6	Fazit	145
7	Zusammenfassung	148
8	Abkürzungsverzeichnis.....	150
9	Symbolverzeichnis.....	152
10	Literaturverzeichnis.....	156
11	Abbildungsverzeichnis	169
12	Tabellenverzeichnis	177
13	Formelverzeichnis.....	180