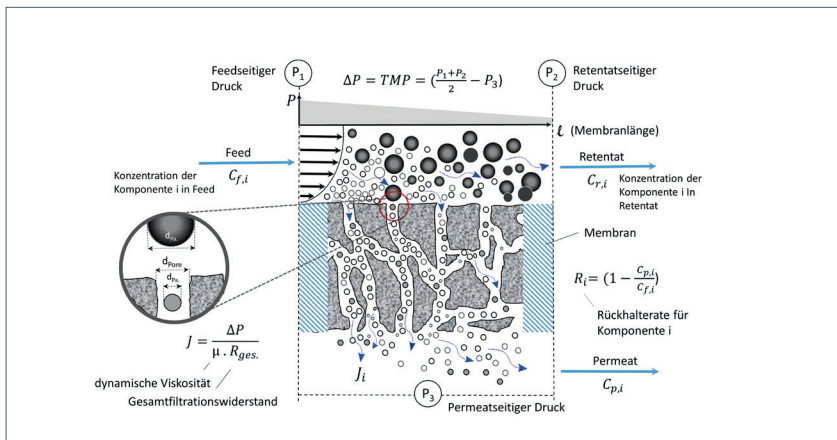


Mehrdad Ebrahimi

Keramische Membrantechnologie zur Wasserreinigung und Wertstoffrückgewinnung – Ultrafiltration organischer Bestandteile aus komplexen industriellen Abwässern –



Schriftenreihe des Institutes für Bioverfahrenstechnik und Pharmazeutische Technologie | Band 24

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Peter Czermak

**Keramische Membrantechnologie zur Wasserreinigung und
Wertstoffrückgewinnung -Ultrafiltration organischer Bestandteile
aus komplexen industriellen Abwässern-**

Kumulative Dissertation

Dem Fachbereich Biologie und Chemie
der Justus-Liebig-Universität Gießen
zur Erlangung des Grades:

Doktor der Naturwissenschaften
Dr. rer. nat.

vorgelegt von
M. Sc., Dipl.-Ing. Mehrdad Ebrahimi

Gießen 2021

Dekan: Prof. Dr. Thomas Wilke

Prüfungskommission:

Prof. Dr.-Ing. Peter Czermak
Prof. Dr.-Ing. Stefan Panglisch
Prof. Dr. Bernd Smarsly
Prof. Dr. Jürgen Janek

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Czermak

Leiter des Instituts für Bioverfahrenstechnik und Pharmazeutische Technologie-IBPT,
Technische Hochschule Mittelhessen-THM-, Gießen.
Honorarprofessor, Fachbereich 08- Biologie und Chemie, Justus-Liebig-Universität,
Gießen

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Panglisch

Lehrstuhl Mechanische Verfahrenstechnik/Wassertechnik (MVT/WT), Universität
Duisburg-Essen.

Schriftenreihe des Institutes für Bioverfahrenstechnik und
Pharmazeutische Technologie

Band 24

Mehrdad Ebrahimi

**Keramische Membrantechnologie zur
Wasserreinigung und Wertstoffrückgewinnung
– Ultrafiltration organischer Bestandteile aus
komplexen industriellen Abwässern –**

D 26 (Diss. Universität Giessen)

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Giessen, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8630-0

ISSN 2198-5731

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

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bioverfahrenstechnik und Pharmazeutische Technologie (IBPT) der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM).

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und dem Leiter des Instituts Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Czermak für das stets entgegengebrachte Vertrauen und den mir gewährten Gestaltungsfreiraum bei der Durchführung und Anfertigung der vorliegenden Dissertation, die erst durch Ihn ermöglicht wurde.

Mein ausdrücklicher Dank gebührt Prof. Dr.-Ing. Stefan Panglich (Universität Duisburg-Essen) für die Übernahme des Korreferats.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen sowie allen Studierenden, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Symbolverzeichnis	ii
Liste der Publikationen	1
Zusammenfassung	2
Abstract	4
Motivation und Zielsetzung	6
Einleitung und Struktur der Arbeit	8
1 Zusammenfassung des Kumulativen Teils der Dissertation	11
1.1 Publikation I	11
1.2 Publikation II	11
1.3 Publikation III	12
1.4 Publikation IV	13
1.5 Publikation V	13
1.6 Publikation VI	14
2 Theoretische Grundlagen und Stand des Wissens	15
2.1 Membranverfahren	15
2.2 Synthetische Membranen	17
2.3 Membranklassifizierung	18
2.4 Anorganische keramische Membranen	18
2.4.1 Aufbau von keramischen Membranen	19
2.5 Das Phänomen Membranfouling	20
2.6 Klassifizierung des Membranfoulings:	21
2.6.1 Klassifizierung nach Ursprung des Membranfoulings	21
2.6.1.1 Partikuläres Fouling	21
2.6.1.2 Kolloidales Fouling	21
2.6.1.3 Organisches Fouling	21
2.6.1.4 Anorganisches Fouling	22
2.6.1.5 Biologisches Fouling	22
2.6.2 Klassifizierung nach Reversibilität des Membranfoulings	22
2.7 Mechanismen des Membranfoulings	22
2.8 Analyse der Foulingmechanismen	24
2.9 Konzentrationspolarisation	26
3 Ausblick	27
4 Referenzen	28

Symbolverzeichnis

Akronym	Bedeutung	Dimension
ADM	Asymmetrische dichte Membranen	-
APM	Asymmetrische Porenmembranen	-
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid	-
ANN	Künstliche neuronale Netze (<i>artificial neural network</i>)	-
C _{f,i}	Konzentration der Komponente <i>i</i> im Feed	g.L ⁻¹
C _{r,i}	Konzentration der Komponente <i>i</i> im Retentat	g.L ⁻¹
C _{p,i}	Konzentration der Komponente <i>i</i> im Permeat	g.L ⁻¹
CFD	Computational Fluid Dynamics	-
CHFM	Keramische Hohlfasermembranen (<i>ceramic hollow fiber membranes</i>)	-
CIP	Clean-in-Place	-
CSB	Chemische Sauerstoffbedarf	mg.L ⁻¹
CFV	Überströmungsgeschwindigkeit (<i>cross flow velocity</i>)	m.s ⁻¹
CPB	Complete Pore Blocking	-
d _{pore}	Durchmesser der Membranpore	m
d _{pa}	Durchmesser der Partikel	m
ΔP	Transmembrane Druckdifferenz	bar
Δπ	Differenz des osmotisches Druckes	bar
IBPT	Institut für Bioverfahrenstechnik und Pharmazeutische Technologie	-
IPB	Intermediate Pore Blocking	-
δ	Grenzschichtdicke	m
<i>J</i>	Permeatfluss	L.m ⁻² .h ⁻¹
<i>J</i> ₀	Initialer Permeatfluss	L.m ⁻² .h ⁻¹
<i>J</i> [*]	Permeatfluss der stationären Phase	L.m ⁻² .h ⁻¹
kDa	Kilodalton	-
<i>K</i> _{0,1,1,5,2}	Phänomenologische Koeffizienten	-
<i>l</i>	Membranlänge	m
LDM	Lösungsdiffusionsmembran	-
LS	Lignosulfonate	-
MF	Mikrofiltration	-
MWCO	Molekulargewichtsgrenzwert (<i>molecular weight cut-off</i>)	-
<i>n</i>	Foulingindex	-
NF	Nanofiltration	-
OMS	Ölhaltige Modelllösung (<i>oily model solution</i>)	-

OSPAR	Oslo-Paris-Konvention (<i>Oslo-Paris-Convention</i>)	-
PAN	Polyacrylnitril	-
PES	Polyethersulfon	-
P_1	Feedseitiger Druck vor der Membran	bar
P_2	Retentatseitiger Druck nach der Membran	bar
P_3	Permeatseitiger Druck	bar
PI	Polyimide	-
PP	Polypropylen	-
PSU	Polysulfon	-
PTFE	Polytetrafluorethylen	-
PVDF	Polyvinylidenfluorid	-
ppm	Parts per Million	-
PW	Produktionswässer aus Ölfeldern (<i>Produced Water</i>)	-
R_i	Rückhalterate für die Komponente i	
$R_{ges.}$	Gesamtfiltrationswiderstand	m^{-1}
$R_{irrev.}$	Irreversibler Foulingwiderstand	m^{-1}
$R_{rev.}$	Reversibler Foulingwiderstand	m^{-1}
R_m	Membranwiderstand	m^{-1}
R_f	Foulingwiderstand	m^{-1}
R_{ad}	Adsorptionswiderstand	m^{-1}
R_{cp}	Widerstand der Konzentrationspolarisation	m^{-1}
RO	Umkehrosmose (<i>reverse osmosis</i>)	-
SiC	Siliziumcarbid	-
SPB	Standard Pore Blocking	-
TMP	Transmembrane Druckdifferenz (<i>transmembrane pressure</i>)	bar
TC	Gesamtkohlenstoff (<i>total carbon</i>)	$mg.L^{-1}$
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff (<i>total organic carbon</i>)	$mg.L^{-1}$
μ	dynamische Viskosität	Pa·s