

Biofouling bei Membranprozessen

Springer

Berlin

Heidelberg

New York

Barcelona

Budapest

Hong Kong

London

Mailand

Paris

Tokyo

Hans-Curt Flemming

Biofouling bei Membranprozessen

Willy-Hager-Stiftung Stuttgart

Mit 114 Abbildungen



Springer

PD Dr. habil. Hans-Curt Flemming
Technische Universität München
Lehrstuhl für Wassergüte und Abfallwirtschaft
Am Coulombwall
D-85748 Garching

ISBN-13:978-3-642-79372-1 e-ISBN-13:978-3-642-79371-4
DOI: 10.1007/978-3-642-79371-4

CIP-Eintrag beantragt

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1995

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Fotosatz-Service Köhler OHG
SPIN: 10465210 02/3020 – 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

*Dieses Buch ist
Herrn Oberingenieur Kurt Marquardt
gewidmet*

Danksagung

Die Arbeiten zum Biofouling bei Membranprozessen gehen auf Anregung und Initiative von K. Marquardt zurück, der ihre Förderung durch den Stiftungsrat der Willy-Hager-Stiftung, Stuttgart, maßgeblich unterstützt hat. Dieser Stiftung gebührt mein Dank dafür, daß sie viele Jahre lang Sach- und Personalmittel zur Durchführung des Forschungsprojektes zur Verfügung gestellt hat. Dieser Dank gilt insbesondere auch Herrn Prof. Dr. G. Eigenberger als weiterem wissenschaftlichen Mitglied des Stiftungsrates. Mittel für Grundlagenuntersuchungen zum Thema wurden zusätzlich von der DFG gewährt, der hierfür ebenfalls herzlich gedankt wird.

Die Arbeiten wurden in der chemischen Abteilung des Instituts für Siedlungswasserbau an der Universität Stuttgart, langjährig geleitet von Prof. Dr. Wagner, durchgeführt. Seine Unterstützung des Projekts war sehr wertvoll. Ohne den sachkundigen, intensiven und innovativen Einsatz meiner Mitarbeiter wäre die Durchführung allerdings nicht möglich gewesen. Hier ist in erster Linie Frau Dr. Gabriela Schaule, Herrn Thomas Griebe, Herrn Jürgen Schmitt und ganz besonders Frau Hanna Rentschler und Frau Andrea Kern zu danken. Prof. Dr. K. Poralla, Universität Tübingen, hat die Dissertation von Frau Dr. Schaule betreut und entscheidende mikrobiologische Aspekte beige-steuert. Dr. Wolfgang Ruck als Laborleiter hat sowohl die organisatorische Abwicklung im Labor geregelt als auch manche Hindernisse rechtzeitig erkannt und zu ihrer Überwindung beigetragen. Darüber hinaus hat er viele Anregungen zum Projekt beige-steuert. Dr. Richard McDonogh hat die Arbeiten zur Permeabilität von Biofilmen durchgeführt und bei der Betreuung der Studienarbeiten von E. Gaveras und M. Beck Pate gestanden. Seine unkonventionellen australischen Ideen und seine Tatkraft waren höchst hilfreich. Herr Schoppmann vom Institut für Mikrobiologie der Universität Tübingen hat mit seiner Erfahrung und Kunstfertigkeit die elektronenmikroskopischen Aufnahmen zu einem wertvollen Hilfsmittel machen können, wofür ich ihm ganz speziell danke. Vielen ausländischen Kollegen bin ich dankbar für die hilfreichen und substanziellen Diskussionen und Kooperationen – vor allem Dr. H.F. Ridgway (Water Factory 21, Orange County), Prof. Dr. A. Fane (Membrane Centre, University of New South Wales, Sydney) und Prof. Dr. K.C. Marshall (Microbiol. Dep., University of New South Wales, Sydney).

Der Kontakt zur Anwendungspraxis war ebenfalls eine wesentliche Quelle der Inspiration. Die Diskussionen mit Herrn Nagel (Hager und Elsässer), Herrn Dr. Ladendorf (Aqua Engineering), Herrn Dr. P. Sehn (Dow Chemical) und Herrn Krack (Henkel Ecolab) gaben immer wieder die Möglichkeit, unsere Ergebnisse mit dem Betrieb großer Membrananlagen zu vergleichen, was immer wieder neue Einsichten eröffnete.

Nicht zuletzt hat die hervorragende Betreuung durch den Verlag – ganz wesentlich durch Frau Dr. M.Hertel – diesem Buch zum Leben verholfen.

München, Januar 1995

Hans-Curt Flemming

Vorwort

Seit 1975 fördert die Willy-Hager-Stiftung wissenschaftliche Arbeiten auf dem Gebiet des Umweltschutzes, insbesondere der Verfahrenstechnik der Wassereinigung und -aufbereitung des Frisch- und Abwassers.

Das vorliegende Buch faßt die von der Stiftung geförderten Arbeiten zur Problematik des Biofouling bei Membranprozessen zusammen. Diese Arbeiten begannen 1986 und wurden von Herrn Dr. habil. H.-C. Flemming mit seiner Arbeitsgruppe in der Abteilung des Instituts für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISW) der Universität Stuttgart durchgeführt.

Membranprozesse gehören zu den energiesparenden, kostengünstigen und umweltschonenden Wasseraufbereitungsverfahren. Biofouling stellt dabei allerdings immer noch ein nicht befriedigend gelöstes Problem dar. Die Untersuchungen der Arbeitsgruppe haben gezeigt, wie komplex die Zusammenhänge sind und auch, wie sehr die zugrundeliegende Problematik häufig noch unterschätzt wird.

Das Verständnis des Biofouling auf der Grundlage der Biofilm-Entwicklung hat den Weg zu neuen Ansätzen eröffnet. Ursachen, Mechanismen und Gesetzmäßigkeiten, die für das Biofouling maßgeblich sind, konnten aufgedeckt werden. Von besonderem Interesse ist die sorgfältige Diskussion von Maßnahmen, die zu einer Verringerung oder Vermeidung von Biofouling führen. Dabei sind vor allem solche Lösungsansätze interessant, die mit wenig oder völlig ohne Zugabe von Bioziden auskommen.

Viele der hier vorgestellten Ergebnisse wurden bereits auf Tagungen oder in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht und haben internationale Anerkennung gefunden. Um so wichtiger erscheint es uns, die Ergebnisse in einer kommentierten, zusammenfassenden Monographie der Fachwelt zur Verfügung zu stellen.

Für die geleistete Arbeit und die mit der Abfassung dieser Monographie verbundene zusätzliche Mühe möchte der Stiftungsrat dem Autor, Herrn Dr. H.-C. Flemming, seiner Arbeitsgruppe sowie der Abteilung Chemie, lange Jahre durch Herrn Prof. Dr. R. Wagner geführt, seinen besonderen Dank aussprechen.

Wir sind überzeugt, daß das Ziel der Willy-Hager-Stiftung, mit ihren begrenzten Mitteln richtungweisende Forschung zu fördern, durch den außergewöhnlichen Einsatz der Forschergruppe von Dr. Flemming in vollem Maße erreicht wurde.

Für den Stiftungsrat
Gerhart Eigenberger

Inhalt

Abkürzungen und Akronyme	XIII
Überblick	1
1 Was ist Biofouling?	6
1.1 Biofouling als Biofilm-Problem	7
1.2 Das Konzept der Toleranzschwelle	9
2 Auswirkungen von Biofouling	11
2.1 Erhöhter Membranwiderstand	13
2.2 Erhöhter Reibungswiderstand	15
2.3 Konzentrationspolarisation	15
2.4 Kosten	16
2.5 Mikrobieller Angriff	18
3 Beispiele für Schadensfälle durch Biofouling	22
3.1 Oberflächenwasser-Aufbereitungsanlagen	23
3.2 Biofouling in einer Reinstwasser-Anlage	26
3.3 Exkurs: Biofouling und die Keime im Rein- und Trinkwasser	32
3.3.1 Die Nährstoff-Frage	36
3.3.2 Trinkwasser	38
3.3.2.1 Pathogene und potentiell pathogene Bakterien in Biofilmen	38
3.3.2.2 Viren	39
3.3.2.3 Massenvermehrung von nicht-pathogenen Keimen auf Oberflächen	39
3.4 Biofouling bei Membranbehandlung von Sickerwasser	43
4 Die Entwicklung von Biofilmen auf Membranen	46
4.1 Induktionsphase	48
4.1.1 Conditioning film	48
4.1.2 Primäradhäsion	50
4.1.2.1 Hydrophobe Wechselwirkungen	53
4.1.2.2 Elektrostatische Wechselwirkungen	60
4.1.2.3 Wasserstoffbrückenbindungen	64
4.1.2.4 Rolle der extrazellulären polymeren Substanzen (EPS)	66

- 4.1.2.5 Einfluß der Zellkonzentration im Wasser 71
- 4.2 Primärer Biofilm auf Membranen in dynamischen Systemen . . 73
 - 4.2.1 Einfluß der Scherkräfte 74
 - 4.2.2 Einfluß des Spacers bei der Membranbehandlung
von Trinkwasser 75
 - 4.2.3 Berechnung der Dicke des primären Biofilms 76
 - 4.2.4 Rolle der Permeabilität des Biofilms 76
- 4.3 Biofilm-Bildung in einer RO-Testzelle 82
 - 4.3.1 Versuche mit Trinkwasser als Rohwasser 84
 - 4.3.2 Versuche mit hochbelasteten Wässern 90
 - 4.3.2.1 Einfluß des Spacers bei der Membranbehandlung
von Sickerwasser 92
 - 4.3.2.2 Beitrag des Biofouling zum Gesamtfouling 97
- 5 Bekämpfung von Biofouling 103**
 - 5.1 Nachweis von Biofouling 103
 - 5.1.1 Problematik der Probenahme 105
 - 5.1.2 Analyse von Biofilmen 109
 - 5.2 Beseitigung von Biofouling 114
 - 5.2.1 Biozide 114
 - 5.2.2 Reinigung von Membranen 118
 - 5.2.3 Kombinierte Wirkung von Reiniger und Scherkraft 126
 - 5.2.4 Erfolgskontrolle 130
 - 5.3 Verhinderung von Biofouling 134
 - 5.3.1 Das Biofouling-Potential 134
 - 5.3.2 Vorbehandlung des Rohwassers 136
 - 5.3.2.1 Biozid-Dosierung 136
 - 5.3.2.2 Entfernung der Mikroorganismen aus dem Rohwasser 141
 - 5.3.2.3 Senkung der Nährstoffkonzentration im Rohwasser 141
 - 5.3.2.4 Nährstofflimitierung und Biofouling bei
Umkehrosmose-Membranen 146
 - 5.3.2.5 Adhäsionshemmende Stoffe 149
 - 5.3.3 Erhöhung der Fließgeschwindigkeiten 150
 - 5.3.4 Erhöhung der Toleranzschwelle durch Zusatz von Stoffen,
welche die Permeabilität von Biofilmen steigern 153
 - 5.3.5 Modulkonstruktion 157
 - 5.3.6 Membranmaterial 157
 - 5.3.7 Technische Hygiene 161
 - 5.4 Monitoring 162
- 6 Literaturverzeichnis 163**
- 7 Sachverzeichnis 177**

Abkürzungen und Akronyme

AOC	Assimilierbarer organischer Kohlenstoff
BDOC	engl.: biodegradable dissolved oxygen carbon
BSA	Rinderserumalbumin
BSB	biologischer Sauerstoffbedarf
CA	Celluloseacetat
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
CTC	5-Cyano-2, 3-Dimethyltetrazoliumchlorid
DOC	engl.: dissolved organic carbon
EPS	extrazelluläre polymere Substanzen
KBE	Koloniebildende Einheiten
MY	Myoglobin
PP	Polypropylen
PX	Plexiglas
REM	Rasterelektronenmikroskop
RO	Umkehrosmose (engl.: reverse osmosis)
SDBS	Natriumdodecylbenzolsulfat
SDS	Natriumdodecylsulfat, engl.: Sodiumdodecylsulphate
TFC	engl. thin film composite membrane
TOC	engl. total organic carbon; gesamter organischer Kohlenstoff