

Harald Kadereit

**Ein Beitrag zur Integration
der Membranverfahren in die
Prozeßsynthese**



Cuvillier Verlag Göttingen

Ein Beitrag zur Integration der Membranverfahren in die Prozeßsynthese

Vom Promotionsausschuß der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von Harald Kadereit
aus Bremen

2003

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2003
Zugl.: Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 2003
ISBN 3-89873-622-9

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Hapke
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. G. Gruhn
Tag der mündlichen Prüfung: 04. April 2002

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2003
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2003
Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-89873-622-9

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1996 bis 2000 am Arbeitsbereich Verfahrenstechnischer Apparatebau der TU Hamburg-Harburg unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. J. Hapke, dem ich für die Betreuung und nicht zuletzt für die finanzielle Unterstützung danke.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Gruhn danke ich für die Übernahme des Koreferates sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Keil für den Vorsitz im Prüfungsausschuß.

Hr. Dr.-Ing R. Günther danke ich für sein Engagement hinsichtlich der Kooperation mit der Gesellschaft für heuristische Beratungssysteme mbH (GHN) und die zahlreichen Anregungen für diese Arbeit.

Allen Mitarbeitern der GHN, insbesondere Herrn G. Krabbe, danke ich die fruchtbaren Diskussionen bezüglich des Beratungssystemes, für die Hilfe auch in schwierigen Fragen der wissensbasierten Programmierung und die freundliche Aufnahme während meiner mehrfachen Aufenthalte in Dortmund.

Gleichsam gilt mein Dank den Mitarbeitern der Firmen, die durch ihr Entgegenkommen die mehrfachen Gespräche zum Wissenserwerb ermöglichten und damit maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen derzeitigen und ehemaligen Mitarbeitern des Arbeitsbereiches danke ich für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre.

Meinen ehemaligen Diplomanden Chr. Rätke, T. Martin und J. Bestian danke ich für die tatkräftige Unterstützung.

Hamburg, den 19.01. 2003

Harald Kadereit

0 Inhaltsverzeichnis

0	Inhaltsverzeichnis	5
1	Einleitung	7
2	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	11
3	Membrantechnik	12
3.1	Grundlagen der Membranverfahren	12
3.2	Technische Membranen.....	15
3.2.1	Polymermembranen.....	16
3.2.2	Anorganische Membranen.....	17
3.3	Technische Membranmodule	19
3.3.1	Rohrmodul.....	20
3.3.2	Kapillarmodul.....	21
3.3.3	Hohlfasermodule	23
3.3.4	Plattenmodul.....	25
3.3.5	Kassettenmodul	27
3.3.6	Wickelmodul	28
3.4	Umkehrosmose	29
3.5	Nanofiltration	35
3.6	Leistungsmindernde Faktoren	38
3.6.1	Druckverluste.....	38
3.6.2	Konzentrationspolarisation	39
3.6.3	Deckschichtbildung	42
4	Fouling und Gegenmaßnahmen	43
4.1	Fouling.....	43
4.1.1	Scaling	45
4.1.2	Biofouling.....	47
4.1.3	Organisches Fouling	50
4.1.4	Kolloidales Fouling	52
4.2	Maßnahmen zur Reduzierung von Fouling.....	53
4.2.1	Entwicklung neuer Membranen.....	53
4.2.2	Feedvorbehandlung.....	54
4.2.3	Verfahrenstechnische Parameter.....	59
4.2.4	Reinigung und Desinfektion	60
5	Verfahrensentwicklung.....	63
6	Stand der Technik	66
6.1	Auslegungsstrategie von Membranexperten	66

6.2	Umgesetzte Programmsysteme	68
6.3	Vorhandene Simulationsprogramme	69
7	Beratungssystem MEMPERT	71
7.1	Bearbeitungsphasen	73
7.2	Feedanalyse	74
7.3	Verfahrensauswahl	76
7.4	Modulwahl	77
7.4.1	Moduldatenbank	79
7.4.2	Wissensbasis	81
7.4.2.1	Modultyp	82
7.4.2.2	Membranmaterial	84
7.4.2.3	Fouling, Scaling und Reinigung	85
7.4.2.4	Bewertung	88
7.5	Simulation	89
7.6	Trennbeispiele	91
7.6.1	Aufkonzentrierung von Essigsäure	91
7.6.2	Recycling von Waschwasser aus der Dosenproduktion	97
8	Zusammenfassung – Ausblick	104
9	Anhang	106
9.1	Chemische Stabilität der Membranmaterialien	106
9.2	Regeln zur wissensbasierten Membran- und Modulwahl	113
9.3	Theorie der Elektrolyte	116
9.3.1	Löslichkeitsprodukt	116
9.3.2	Säure-Base-Reaktion	117
9.4	Löslichkeitsprodukte einiger schwerlöslicher Salze	118
9.5	pK _S -Werte einiger Säure-Base-Paare	121
10	Literaturverzeichnis	122
11	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	133
11.1	Abbildungsverzeichnis	133
11.2	Tabellenverzeichnis	134
12	Symbolverzeichnis	135

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat der Einsatz der Membrantechnik deutlich zugenommen. Im Jahr 1998 lag der Wert installierter Membrananlagen bei ca. 4,4 Milliarden US\$ mit einer prognostizierten Gesamtwachstumsrate von über 8 %/a, davon 400 Millionen US\$ für die Umkehrosiose mit einem Wachstum von ca. 10 %/a [1]. Der relative Anteil der Membranverfahren am Gesamtumsatz hat sich von 1996 bis 1998 nur geringfügig verändert (vgl. Abb. 1-1) [2]. Nach neuen Schätzungen werden für 2000 bei Membrananlagen im Querstrombetrieb weltweit sogar 4,7 Milliarden US\$ erwartet. Auf Deutschland entfallen dabei ca. 200 Millionen US\$, davon 57 Millionen für die Umkehrosiose [3]. Neben ständigen Verbesserungen der Membran und der Module haben Anlagentechnik und sinkende Produktionskosten zur Verbreitung der Membranverfahren beigetragen. Besonders letztgenannter Punkt ermöglicht der Membrantechnik, neue Anwendungsfelder zu gewinnen, in denen ein Einsatz bisher unwirtschaftlich erschien.

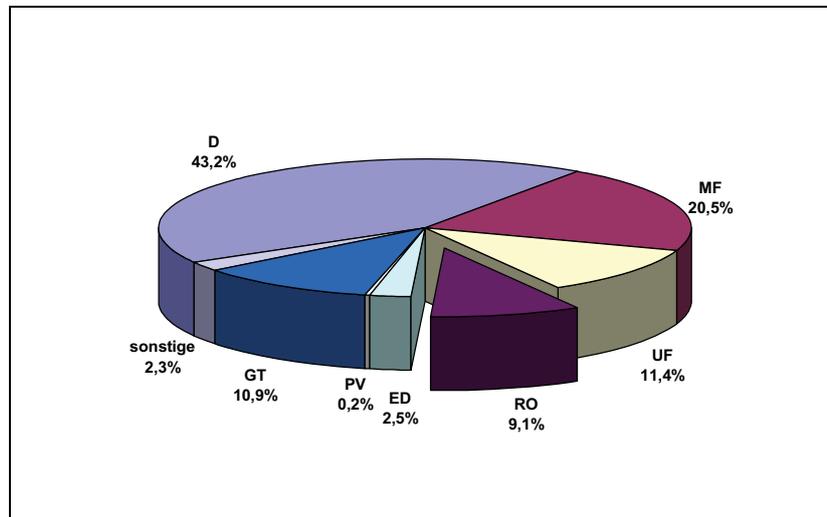


Abb. 1-1: Relativer Anteil der einzelnen Membranverfahren am Gesamtumsatz 1998 [1]
– MF: Mikrofiltration, UF: Ultrafiltration; RO: Umkehrosiose; ED: Elektrodialyse;
PV: Pervaporation; GT: Gastrennung; D: Dialyse

Entscheidenden Anteil daran, daß sich die Membranverfahren in vielen Bereichen als wirtschaftliche Alternative erwiesen haben, hatte die Entwicklung der asymmetrischen Celluloseacetat-Membran von Loeb und Sourirajan in den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts [4]. Diese Membran führte mittels der dünnen Aktivschicht zu höheren Permeatflüssen und durch die geringere zu installierende Fläche bei niedrigerem Betriebsdruck zu einer deutlichen Kostenreduzierung. Die Umkehrosiose wurde als Alternative zur Mehrstufenverdampfung bei der Meerwasserentsalzung wirtschaftlich attraktiv.

Nach wie vor liegt die Mehrzahl der Anwendungen der Umkehrosiose und Nanofiltration in der Aufbereitung wäßriger Lösungen. Zusammen mit der Ultra- und Mikrofiltration sind diese druckgetriebenen Membranverfahren in der Wasser- und Abwassertechnik nicht mehr wegzudenken. Der Umsatz der Membrantechnik lag 1998 im Bereich Wasser-/

Abwassertechnik bei ca. 750 Millionen US\$ [1]. Bei der Trinkwassergewinnung aus Meer- oder Brackwasser entfielen 1994 immerhin mit etwa 5 Millionen Kubikmeter pro Tag ca. 1/3 der aufbereiteten Menge auf die Umkehrosmose [5]. Sie kann daher auch als Standardverfahren in diesem Bereich angesehen werden.

Eine Analyse der veröffentlichten Applikationen der Membranverfahren außerhalb der Trinkwassergewinnung verdeutlicht, daß der Einsatz der Membrantechnik meistens „end-of-pipe“ erfolgt. Bedingt durch immer schärfere Umweltauforderungen und -gesetze müssen die bei der Produktion entstehenden Abfall- und Abwasserströme verringert oder vollständig vermieden werden. Wirtschaftlichen Anreiz bietet dabei nicht nur die Reduzierung der Entsorgungs- und Einleitungskosten sondern auch die Einsparung von Rohmaterialien durch mögliche Rückführung des abgereinigten Stoffstromes. Eine Alternative stellt der eigentliche Verfahrensprozeß dar. Der Prozeß wird so geändert, daß die Schadstoffe gar nicht erst entstehen. Dieser produktionsintegrierte Umweltschutz stellt hohe Anforderungen an das Engineering: Es müssen bei der Überprüfung der Anlage systematisch alle Verfahren hinterfragt und nach günstigeren Alternativen gesucht werden. Dies setzt umfassende Kenntnisse sowohl der etablierten Trennverfahren als auch der Neuentwicklungen voraus. Dabei ist das Risiko, neue noch nicht im industriellen Maßstab bewährte Verfahren einzusetzen, besonders zu bewerten.

Außerhalb der Entsalzung von Meer- und Brackwasser zählt auch die Umkehrosmose zu den innovativen, neuen Verfahren. Abb. 1-2 zeigt allgemein für die wichtigsten Membranverfahren die Trennfähigkeit im Vergleich zu den thermischen und mechanischen Trennverfahren. Prinzipiell stellt die Membrantechnik über den gesamten Größenbereich der Komponenten eine Alternative zu thermischen und mechanischen Trennverfahren dar. Es gibt auf den ersten Blick keinen Grund, der einen Einsatz ausschließt, obwohl in vielen Anwendungsbereichen das Potential nicht ausgeschöpft wird.

Um die bisherige Nichtberücksichtigung der Membrantechnik genauer zu analysieren, müssen Vor- und Nachteile der Membranverfahren näher beleuchtet werden: Zu den Vorteilen zählen die modulare Bauweise, so daß Anlagen relativ einfach erweitert werden können, und die Trennung bei Umgebungstemperatur, was beispielsweise für thermisch unbeständige Komponenten in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie eine Trennung oder Aufkonzentrierung ohne Qualitätseinbuße ermöglicht. Positiv wirken sich der Verzicht auf Trennhilfsstoffe, die Möglichkeit der Wertstoffrückgewinnung sowie der relativ geringe spezifische Energieverbrauch aus. Zu den Nachteilen gehören in vielen Fällen leistungsmindernde Phänomene wie Fouling sowie bei der Umkehrosmose und Nanofiltration die teilweise recht hohen Betriebsdrücke. Durch die oft notwendige Feedvorbehandlung sowie die chemische Reinigung der Anlage entstehen zusätzliche Abfall- und Abwasserströme, die gesondert entsorgt werden müssen.

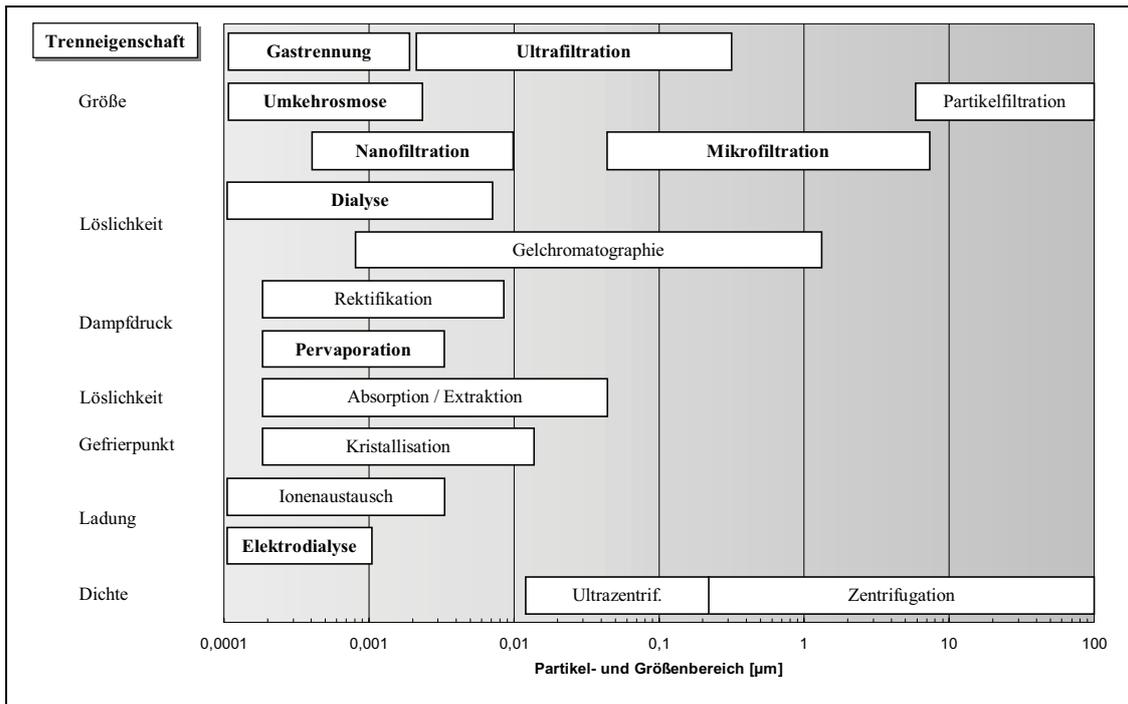


Abb. 1-2: Einordnung der Membranverfahren und thermischer und mechanischer Trennverfahren nach [6], [7] (geändert)

Aufgrund der vielen die Trennung beeinflussenden Wechselwirkungen lassen sich nur wenige allgemein gültige Regeln für die Membran- und Modulauswahl finden. Hier ist Expertenwissen unerlässlich. Zwar bieten die Moduldatenbank des Arbeitsbereiches Apparatebau an der TU Hamburg-Harburg und der Membranatlas des Institutes für Verfahrenstechnik der RWTH Aachen eine Informationsgrundlage über kommerzielle Membranen und Module, doch unterstützen sie die Auswahl von Membran und Modul nicht [8], [9]. In der Praxis scheitern viele Überlegungen auch daran, daß keine Membranen erhältlich sind, die den Spezifikationen gerecht werden.

Ähnlich sieht es im Bereich der Modellierung aus, wo häufig experimentelle Daten die Grundlage für die Simulationsprogramme bilden, da sich die Leistungsdaten wie Fluß und Selektivität bzw. Rückhaltung nur schwer oder in den meisten Fällen gar nicht abschätzen lassen. Fast alle der in der Fachliteratur beschriebenen Modellierungen beschränken sich bei den Verfahren Umkehrosmose und Nanofiltration auf wäßrige Salzlösungen, oftmals sogar begrenzt auf binäre Systeme. Für organisch-wäßrige oder rein organische Systeme sind nur wenige Untersuchungen zu finden [10] - [12].

Im Vergleich zu thermischen Trennverfahren sorgen daher fehlende Auswahlkriterien für Membranen und Module, fehlende oder unzureichende Simulationsmöglichkeiten sowie geringe Erfahrungen für einen mehr oder weniger hohen Versuchsaufwand, um die membranspezifischen Leistungsdaten zu erhalten.

Das Ergebnis einer Anlagenauslegung ist eine erfahrungsbasierte, theoretisch kaum nachvollziehbare Anlagenkonfiguration.

Die bisherigen Bemühungen, die Auslegung von Membrananlagen mit Hilfe von Expertenwissen zu unterstützen, sind häufig auf Module eines Herstellers und/oder auf eine Applikation/Verfahren begrenzt [13] - [15]. In den letzten Jahren wurde auf Basis neuronaler Netze versucht, den Versuchsaufwand zu verringern. Die in der Fachliteratur beschriebenen Programme sind oft auf einzelne Anwendungen begrenzt [16], [17] oder bieten keine Unterstützung bei Auswahl der Feedvorbehandlung und Reinigung [18] und sind daher für einen allgemeinen Einsatz nicht geeignet. Basierend auf den bisherigen Betriebserfahrungen, setzt sich mehr und mehr die Ansicht durch, daß insbesondere das Fouling, das trotz Feedvorbehandlung auftreten kann, und die zu dessen Entfernung notwendige Reinigung mit in den Entscheidungsprozeß der Membran- und Modulauswahl einbezogen werden müssen [19].

In einigen Fällen tragen fehlende Langzeiterfahrungen durch späteres Nachrüsten der Anlage in Verbindung mit nachträglichen zusätzlichen Investitionen zur Beeinträchtigung der Wirtschaftlichkeit bei. Insgesamt führt dies zu einem negativen Image der Membrantechnik. Besonders im Bereich Membran- und Modulauswahl und allgemeinen Modellierung besteht noch Nachholbedarf, um die erfahrungsbasierte Auslegung auch für Personen, die nicht schon jahrelang mit der Membrantechnik arbeiten, nachvollziehbar zu machen und einen Schritt hin zur breiteren Akzeptanz der Membrantechnik in der Industrie zu ermöglichen.

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Um die Membrantechnik als Trennoperation zu etablieren, erscheint es sinnvoll, die Membranverfahren in den frühen Projektierungsphasen Vorprojektierung und Basic-Engineering zu berücksichtigen, in denen die meisten kostenrelevanten Entscheidungen bereits getroffen werden. In diesem Stadium ist ein zeit- und kostenintensiver Versuchsaufwand zur Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten nicht zu rechtfertigen. Daher fehlt bisher eine Möglichkeit, die Membrantechnik bei der Verfahrensauswahl berücksichtigen zu können und die Kosten für Membrananlagen mit minimalem Aufwand zuverlässig abzuschätzen.

Diese und eine gleichzeitig am Lehrstuhl Technische Chemie A der Universität Dortmund durchgeführte Arbeit sollen einen Beitrag zur Integration der Membrantechnik in die Prozeßsynthese leisten. In das Beratungssystem PROSYN¹, ein Programmpaket zur Entwicklung von Anlagenkonzepten, werden die Membranverfahren eingebunden. Dabei wird das prinzipielle Vorgehen von Fachleuten bei der Auslegung von Membrananlagen in ein Programm umgesetzt.

In dieser Arbeit wird ein System vorgestellt, das sowohl die Möglichkeit einer Membran- und Modulauswahl unter besonderer Berücksichtigung von Fouling und Reinigung sowie einer groben Anlagendimensionierung mit Kostenschätzung bietet. Beyer hat in einer am Arbeitsbereich Apparatebau durchgeführten Forschungsarbeit bei der Erstellung eines eigenständigen Systems das Augenmerk auf die Ultrafiltration gelegt [15]. In Fortführung der Forschungsaktivitäten liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf den „dichten“ Membranverfahren Umkehrosmose und Nanofiltration mit dem Vorteil, daß die Membranverfahren mit weiteren Verfahrensoperationen verglichen werden können.

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Membranverfahren Umkehrosmose und Nanofiltration, die kommerziell verfügbaren Membranen und Modultypen und die leistungsmindernden Phänomene vorgestellt. Dem Fouling und möglichen Gegenmaßnahmen ist Kapitel vier gewidmet. Kapitel fünf hat als Thema die Verfahrensentwicklung sowie eine Kurzvorstellung des Programmes PROSYN, während das sechste Kapitel den Stand der Technik bei der Auslegung von Membrananlagen und vorhandene programmtechnische Umsetzungen zusammenfaßt. Das abschließende Kapitel sieben beschreibt das entwickelte Beratungssystem MEMPERT und verdeutlicht den Nutzen mittels zweier Trennbeispiele.

¹ PROSYN (Prozeßsynthese) am Lehrstuhl Technische Chemie A der Universität Dortmund entwickeltes Werkzeug zur systematischen Verfahrensplanung

3 Membrantechnik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Membrantechnik mit Beschränkung auf die druckgetriebenen Verfahren Umkehrosmose und Nanofiltration vorgestellt. Des weiteren wird auf technisch relevante Membranen und Module eingegangen. Prozeßbestimmende Faktoren sind Inhalt des letzten Abschnittes.

Die Begriffe und Definitionen sind an die „European Society of Membrane Science Technology“ angelehnt [20].

3.1 Grundlagen der Membranverfahren

Der Begriff Membrantechnik faßt eine Vielzahl von Membranverfahren zusammen, die sich hinsichtlich Phasenzustand, Triebkraft und eingesetztem Membrantyp unterscheiden. Eine kurze Aufstellung ist in Tab. 3-1 zu sehen. Es handelt sich immer um eine physikalische Trennung, wobei weder chemische oder biologische Reaktionen auftreten noch thermodynamische Gleichgewichte vorliegen.

Allen Verfahren ist die Membran gemein. Diese stellt eine Barriere dar, die zwischen zwei Phasen trennt und den Transport von verschiedenen Stoffen auf eine sehr spezifische Art und Weise beeinflusst. Der Stofftransport ist dabei durch die Triebkraft, die jeweilige Mobilität und Konzentration der verschiedenen Komponenten des Stoffsystems in der Membranphase bestimmt. Die Beständigkeit der Membran hinsichtlich Temperatur, Druck und chemischer Toleranz gegenüber Inhaltsstoffen ist Grundvoraussetzung, daß der Trennprozeß ablaufen kann. Die meisten Membranverfahren dienen der Aufbereitung von flüssigen Medien, wobei bei allen Verfahren auch heterogene Phasenzustände toleriert oder sogar erforderlich sind, z. B. Feststoffanteile eines Abwassers bei der Mikro- und Ultrafiltration. Bei den Anwendungsbeispielen in Tab. 3-1 sind die möglichen Applikationen nicht auf wäßrige Systeme beschränkt, auch wenn es in der Praxis oft so ist.

Allgemein ist die Triebkraft der membrangestützten Membranverfahren die Differenz des elektrochemischen Potentials [21]. Außer bei der Nanofiltration und Elektrodialyse reduziert sich diese zur Differenz des chemischen Potentials. Die einzelnen Membranverfahren unterscheiden sich darin, wie diese Potentialdifferenz aufgeprägt wird.

Neben „porösen“ Membranen, in denen der Stofftransport konvektiv erfolgt, sind auch sogenannte „dichte“ Membranen im Einsatz, bei denen nach der Modellvorstellung der Stofftransport auf Adsorptions-, Diffusions- und Desorptionsvorgängen beruht.

Trennverfahren	Ph.	Triebkraft	Membrantyp	Applikationen
Umkehrosmose	fl/fl	hydr. Druckdifferenz bis max. 200 bar	asymmetrische Lösungs-Diffusionsmembran	Konzentrierung von Stoffen mit niedriger Molmasse
Nanofiltration	fl/fl	hydr. Druckdifferenz bis max. 60 bar	asymmetrische Lösungs-Diffusionsmembran mit fixierter Oberflächenladung	Konzentrierung, Fraktionierung und Reinigung von Lösungen mit mittlerer Molmasse (bei Ionen: Trennung einwertig – mehrwertig)
Ultrafiltration	fl/fl	hydr. Druckdifferenz 3 – 10 bar	asymm. oder symm. Porenmembran; Porengröße von 1 – 200 nm	Konzentrierung, Fraktionierung und Reinigung von makromolekularen Lösungen
Mikrofiltration	fl/fl	hydr. Druckdifferenz 0,5 – 5 bar	asymm. oder symm. Porenmembran (0,1 – 20 µm)	Abtrennung suspendierter Teilchen
Dialyse	fl/fl	Konzentrationsdifferenz	asymm. oder symm. Porenmembran	Abtrennung niedrigmolekularer Komponenten
Elektrodialyse	fl/fl	elektr. Potentialdifferenz	symmetrische Ionenaustauschermembran	Entsalzung und Entsäuerung von Lösungen mit neutralen Stoffen niedriger Molmasse
Pervaporation	fl/d	Partialdruckdifferenz	asymmetrische Lösungs-Diffusionsmembran	Trennung von Flüssigkeitsgemischen
Dampfpermeation	d/d	Partialdruckdifferenz	asymmetrische Lösungs-Diffusionsmembran	Trennung von Dampfgemischen
Gastrennung	g/g	Partialdruckdifferenz	Lösungs-Diffusionsmembran oder Porenmembran	Trennung von Gasgemischen
Flüssigmembrantechnik	fl/fl	Konzentrationsdifferenz	flüssige Stoffe	Abtrennung von Ionen und Gasen aus Flüssigkeiten; Gastrennung; Trennung von flüssigen Gemischen

Tab. 3-1: Überblick über heutige Membranverfahren nach [6], [7], [22] (geändert)
d: dampfförmig; fl: flüssig; g: gasförmig

Kernstück jeder Membrananlage ist das Modul. In diesem Stofftrennapparat ist die für die Trennung verantwortliche Membran in geeigneter Weise konfiguriert, also z. B. als Schlauchmembran (Rohr-, Kapillar-, Hohlfasermodule) oder Flachmembran (Wickel-, Kassetten-, Plattenmodule). Die Membran stellt für sämtliche Komponenten des Stoffsystems eine mehr oder weniger selektive Barriere dar, so daß die Komponenten unterschiedlich gut permeieren. Das Permeat ist der Anteil des Feeds, der durch die Membran hindurchgeht, während der zurückgehaltene Mengenstrom das Modul als Retentat verläßt. In der Regel besteht das Permeat bei den druckgetriebenen Membranverfahren aus dem Lösungsmittel mit geringen Anteilen der gelösten Komponenten, während im Retentat die zurückgehaltenen Komponenten in höheren Konzentrationen auftreten.

Je nach Trennaufgabe und Selektivität kann das gewünschte Produkt als Permeat oder als Retentat anfallen.

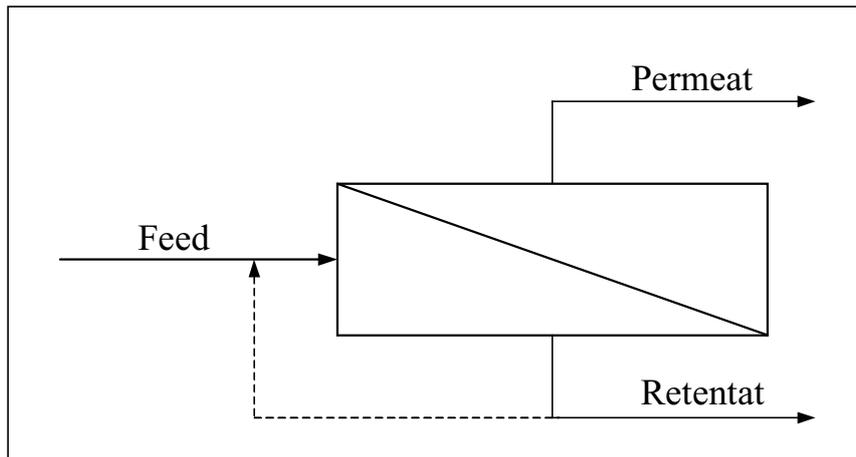


Abb. 3-1: Modul mit Stoffströmen (---- mögliche Rückführung)

Die Leistungsfähigkeit einer Membran bzw. eines Moduls wird durch den Fluß und die Selektivität bzw. Rückhaltung definiert. Der Fluß J , auch als Permeatvolumenstromdichte bezeichnet, ist dabei der auf die Membranfläche bezogene Stoffstrom und wird in der Einheit Volumen/(Fläche * Zeit) oder Masse/(Fläche * Zeit) angegeben. Es gilt

$$J_p = \frac{\dot{V}_p}{A_M} \quad (3-1)$$

Die Selektivität gibt an, wie gut eine Komponente im Vergleich zu einer anderen durch die Membran permeiert. Für die druckgetriebenen Verfahren charakterisiert die Rückhaltung die Qualität des Permeates. Diese muß unterschieden werden in die scheinbare Rückhaltung

$$R_s = 1 - \frac{w_p}{w_f} \quad (3-2)$$

und in die wahre (lokale) Rückhaltung

$$R_w = 1 - \frac{w_p}{w_M} \quad (3-3)$$

Bei der scheinbaren Rückhaltung R_s ist die Permeatkonzentration w_p auf die Feedkonzentration w_f bezogen, bei der wahren Rückhaltung R_w auf die erhöhte Konzentration an der Membranoberfläche w_M . Die wahre Rückhaltung ist aufgrund der Konzentrationspolarisation (vgl. Kapitel 3.6.2) immer größer als die scheinbare.

Die Leistungsfähigkeit eines Moduls oder auch einer gesamten Membrananlage wird außerdem charakterisiert durch die Ausbeute. Die Anlagenausbeute VR , auch Volumenreduktion, gibt das Verhältnis des gesamt anfallenden Permeatvolumenstrom \dot{V}_p zum in die Anlage eintretenden Feedvolumenstrom \dot{V}_f an.

$$VR = \frac{\dot{V}_p}{\dot{V}_f} \quad (3-4)$$