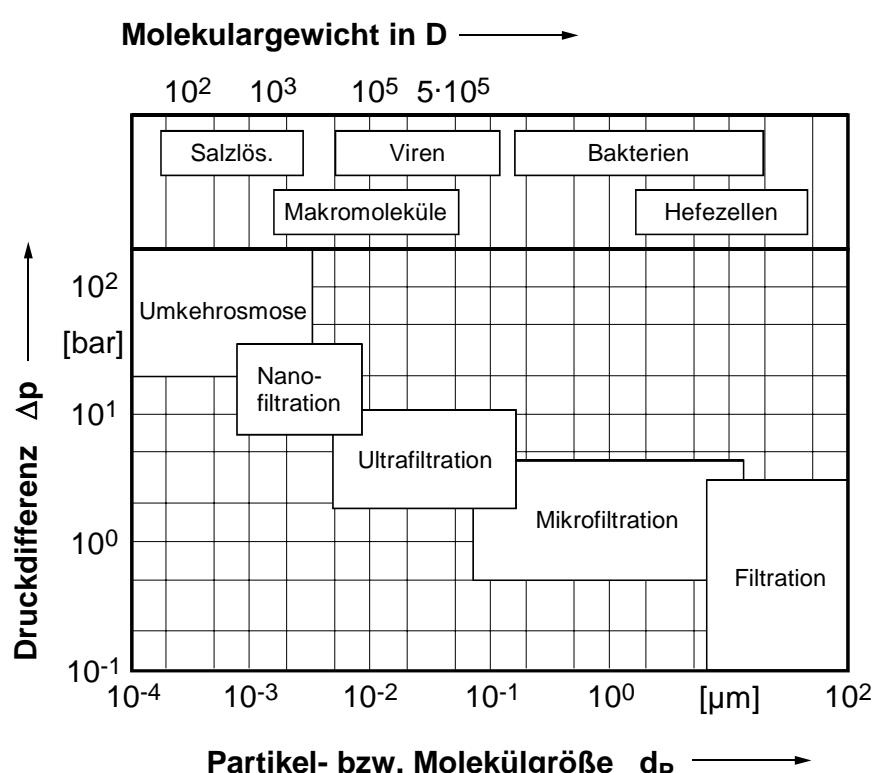


- 1 Membranprozesse, Begriffsdefinitionen
- 2 Modellierung des Stofftransports in Membranen
 - Porenmodell
 - Lösungs-Diffusions-Modell
- 3 Umkehrosmose
- 4 Nanofiltration
- 5 Ultrafiltration und Mikrofiltration
- 6 Triebkraftmindernde Effekte

Folie 1

Zuordnung der druckgetriebenen Membranverfahren

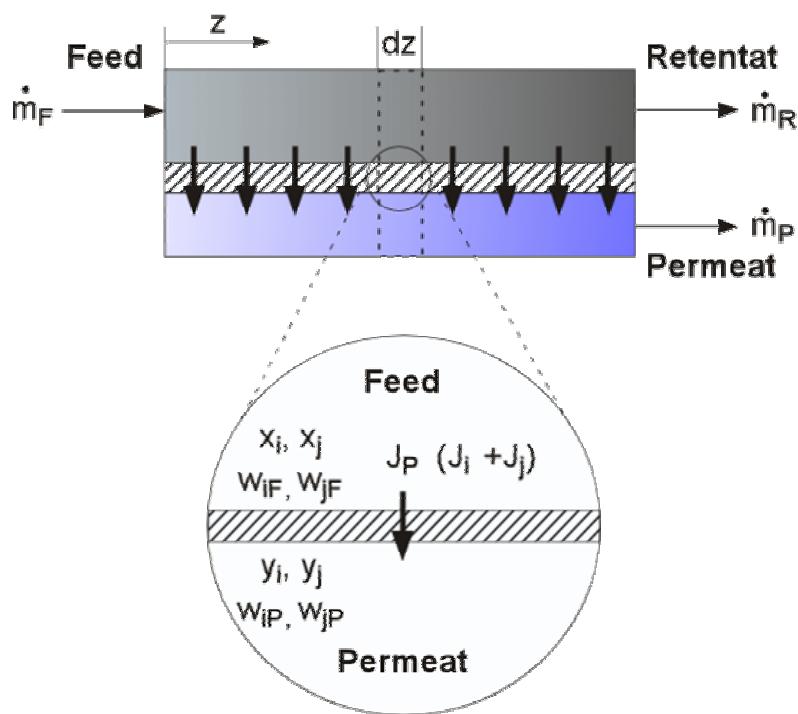


Folie 2

Membranprozess	Porengröße [nm]	Druckbereich Δp [bar]	Permeabilitätsbereich [$L/(m^2 \cdot h \cdot bar)$]	Membrantyp	Anwendung
Mikrofiltration	50 - 5000	0,1 - 2	> 50	Porenmembran	Abtrennung suspensierter Stoffe
Ultrafiltration	2 – 200	1 - 5	10 – 50	Porenmembran	Konzentrieren, Fraktionieren und Reinigen makromolekularer, wässriger Systeme
Nanofiltration	1 - 2	5 - 20	1,4 – 12	Nanoporöse Membran	Fraktionierung gelöster Stoffe in wässrigen Systemen
Umkehrosmose		10 - 100	0,05 – 1,4	Lösungs-Diffusions-Membran	Aufkonzentrieren gelöster Stoffe in wässrigen Systemen, Entsalzung

Folie 3

Definition der wichtigsten Größen



Fluss

$$\dot{m}_P = \dot{m}_i + \dot{m}_j \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$$

$$J_P = \dot{m}_P / \rho_P \quad [\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$$

Selektivität

$$S_{ij} \Big|_X = \frac{y_i / y_j}{x_i / x_j} \quad S_{ij} \Big|_W = \frac{w_{iP} / w_{jP}}{w_{iF} / w_{jF}}$$

Binäres System

$$S_{ij} \Big|_X = \frac{y_i / (1 - y_i)}{x_i / (1 - x_i)}$$

Rückhaltevermögen

$$R_i = \frac{w_{iF} - w_{iP}}{w_{iF}} = 1 - \frac{w_{iP}}{w_{iF}}$$

Folie 4

Transport-Mechanismus:	konvektiv in Poren (real: beide nebeneinander!)	Diffusion nach Lösung in Membran
Bezeichnung:	poröse Membran Porenmembran	dichte Membran Lösungs-Diffusions-Membran
Triebkraft:	Druckdifferenz	Differenz des (elektro)chemischen Potenzials μ

($\Delta\mu$ aufgeprägt durch Druckdifferenz)

Folie 5

Triebkräfte

Triebkräfte resultieren aus Unterschieden im chemischen Potenzial μ .
 μ_i einer Komponente in einer Flüssigkeit:

$$\mu_i(T, p, x_i) = \mu_i^0(T, p^0) + \mathfrak{R} T \ln a_i(T, p^0, x_i) + \tilde{V}_i(p - p^0)$$

Die Konzentration in Form der Aktivität a_i berücksichtigt Nichtidealitäten:

$$a_i = \gamma_i \cdot x_i$$

Die Differenz des chemischen Potenzials lässt sich aufteilen in einen Konzentrationsunterschied und eine Druckdifferenz:

$$\Delta\mu_i = \mathfrak{R} T \Delta \ln a_i + \tilde{V}_i \Delta p$$

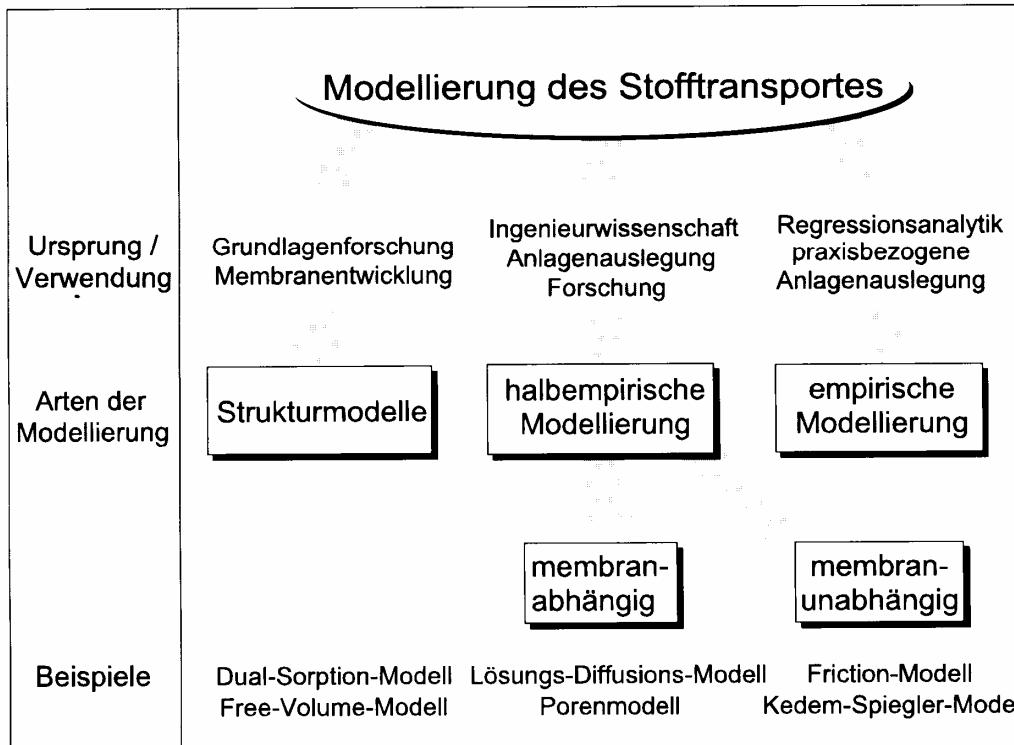
Mit der Definition des osmotischen Drucks:

$$\pi_{i,F} = - \frac{\mathfrak{R} \cdot T}{\tilde{V}_i} \ln a_i$$

ergibt sich:

$$\Delta\mu_i = \tilde{V}_i \cdot [p_F - p_P - (\pi_{i,F} - \pi_{i,P})]$$

Folie 6



Folie 7

Memranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse

2

Modellierung des Stofftransports in Membranen

Technische Universität Berlin



Quelle: Rautenbach 1997

Modellierung des Stofftransports in Membranen

Für ingenieurtechnische Aufgaben: **Halbempirische Modelle**

- Modellgrundlagen
 - Permeationsexperimente am Realsystem
 - idealisierte Modellvorstellungen mit phys.-chem. Hintergrund
- Stoffwerte zur Beschreibung der physikalischen und thermodynamischen Vorgänge auf molekularer Ebene werden zu Parametergruppen zusammengefasst
- Einführung einiger weniger, leicht bestimmbarer freier Modellparameter

→ Quantitativ genaue Beschreibung gemessener Trenncharakteristiken

- Extrapolationen weniger problematisch als bei empirischen Modellen
- aber: keine Vorhersage der Trennleistung

Folie 8

Memranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

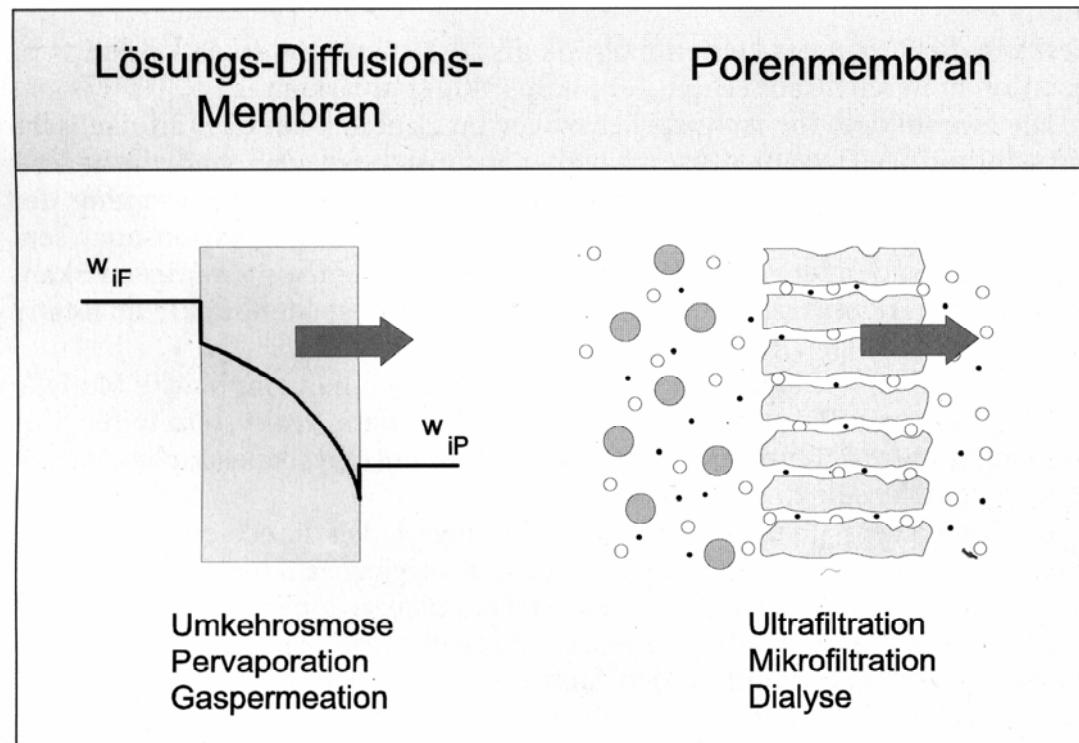
2 Grundlagen der Membranprozesse

2

Modellierung des Stofftransports in Membranen

Technische Universität Berlin





Folie 9

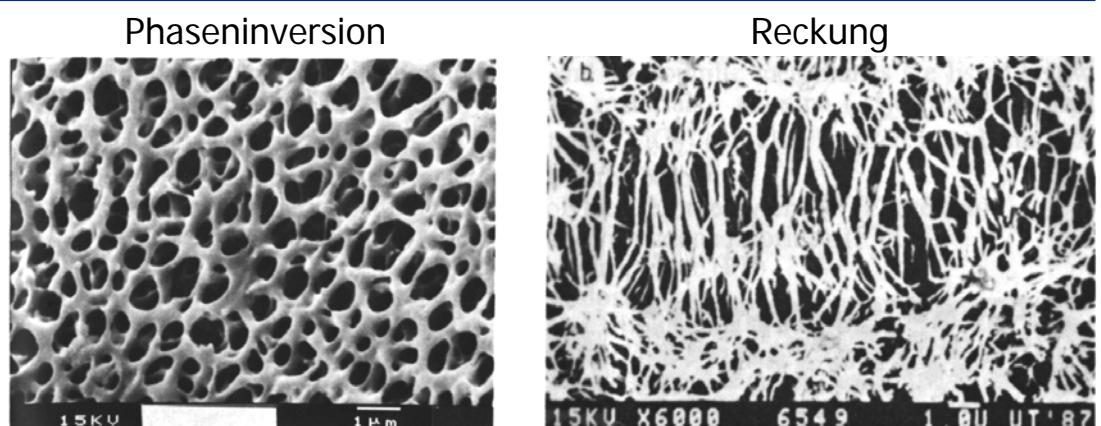
Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
2 Modellierung des Stofftransports in Membranen

Quelle: Rautenbach 1997

Technische Universität Berlin 

Beispiele für unterschiedliche Porenmembranen

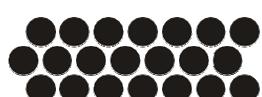


Kernspurtechnik

Charakteristische Porengeometrien:



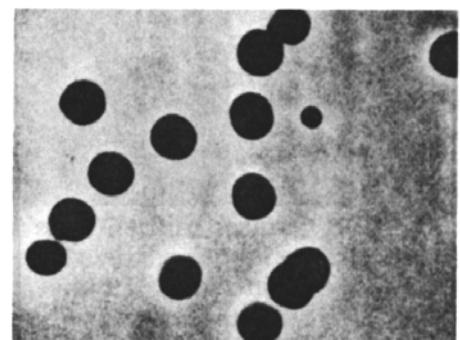
a) runde Kanäle



b) Kugelschüttung



c) Fasermaterial



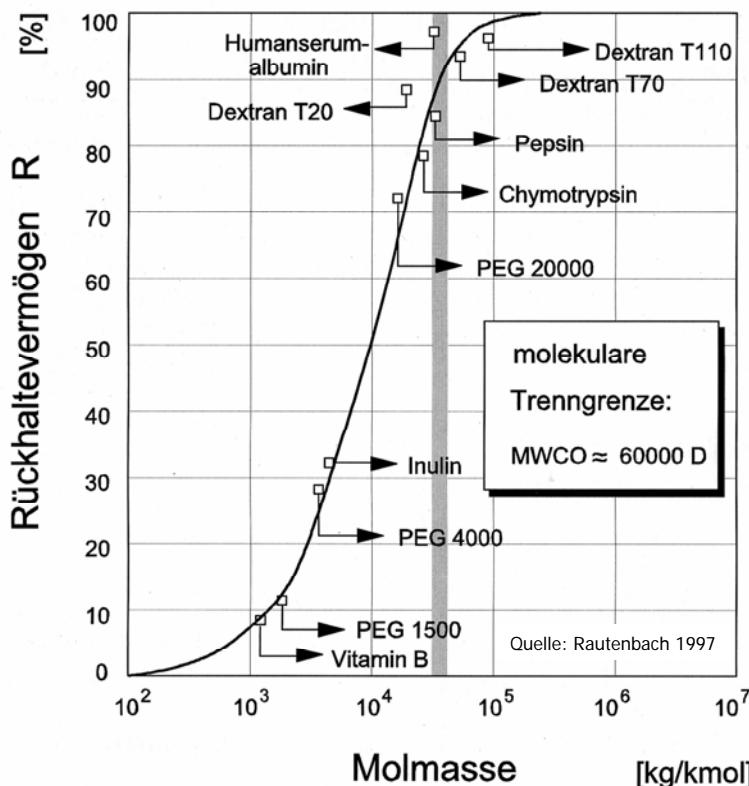
Quelle: Scharnagl, GKSS 2002

Folie 10

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
2 Modellierung des Stofftransports in Membranen

Technische Universität Berlin 



Folie 11

Memranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse 2 Modellierung des Stofftransports in Membranen

Technische Universität Berlin



Angaben der Trenngrenzen:

molecular weight cut-off (MWCO):

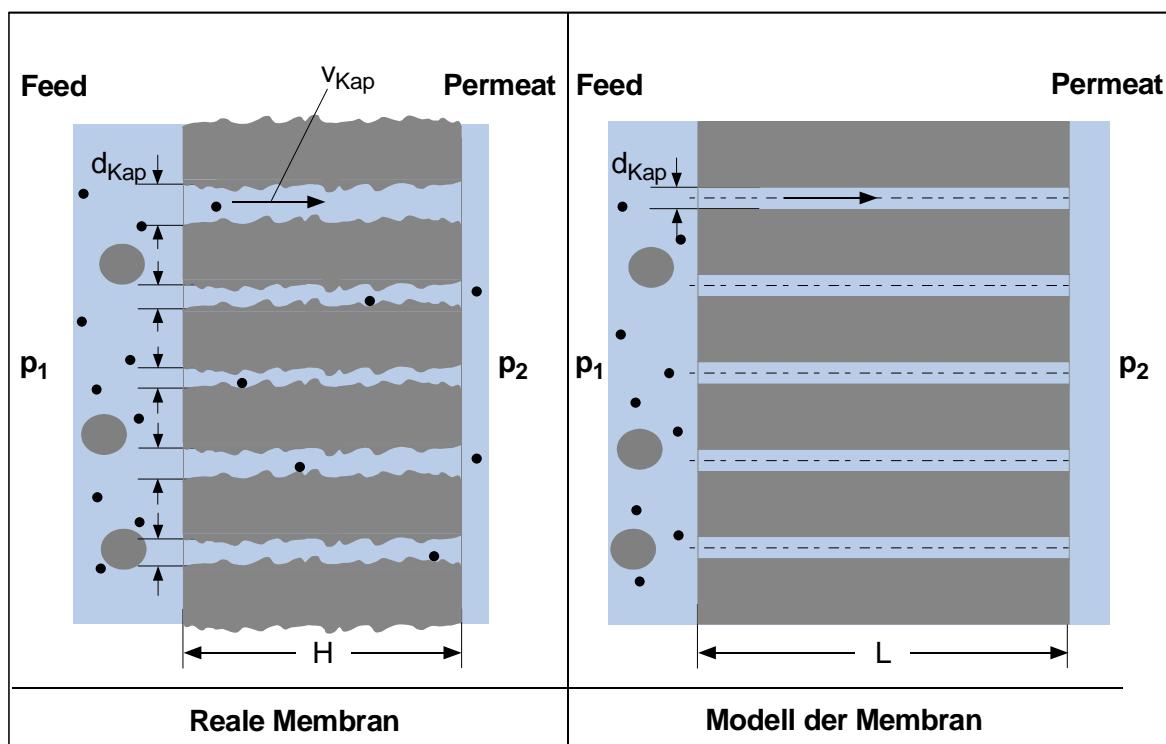
Grenze, bei der 90 (oder 95) % der Moleküle einer bestimmten Molmasse zurückgehalten werden

nominaler Porendurchmesser:

Maximum in der Porengrößenverteilung

Herstellerangaben bzgl. Form und Versuchsbedingungen genau prüfen!

Modell einer Porenmembran



Folie 12

Memranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse 2 Modellierung des Stofftransports in Membranen

Technische Universität Berlin



Molekularer/diffusiver Stofftransport

Ursache: Brownsche Molekularbewegung

Triebkraft: Konzentrationsgradient
in ruhenden und strömenden Medien

$$\frac{\dot{N}_{Am}}{A} = \dot{n}_{Am} = -D_{AB} \cdot \frac{\partial c_A}{\partial x}$$

Konvektiver Stofftransport

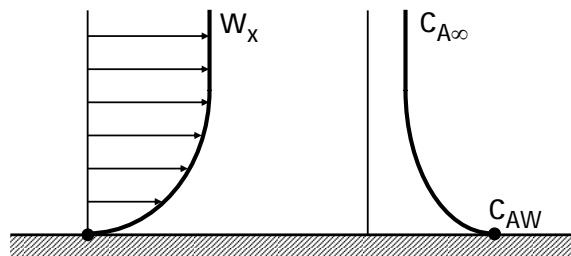
in strömenden Medien

fast immer größer als mol. Transport, dieser daher in Strömungsrichtung vernachlässigbar

$$\frac{\dot{N}_{Ak}}{A} = \dot{n}_{Ak} = w \cdot c_A$$

Konvektiver Stoffübergang

$$\frac{\dot{N}_{ASÜ}}{A} = \dot{n}_{ASÜ} = \beta \cdot \Delta c_A$$



Folie 13

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
2 Modellierung des Stofftransports in Membranen

Technische Universität Berlin



Porenmodell: Zusammenhang Permeatfluss u. Triebkraft

Basis: **Laminare Haufwerksströmung** und Hagen-Poiseuille Gesetz

$$v_{KAP} = \frac{d_h^2}{32 \eta} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad \text{mit } L = \mu H$$

Hydraulischer Durchmesser

$$d_h = \frac{4 \varepsilon}{(1 - \varepsilon) S_{(V)}} \quad \text{mit der volumenbezogenen Oberfläche} \quad S_{(V)} = \frac{A_{Por}}{V_S}$$

und der Durchflussgeschwindigkeit

$$v_{KAP} = \frac{v_P}{\varepsilon} = \frac{\dot{m}_P}{\rho_P \varepsilon}$$

Folgt für den **Zusammenhang Permeatfluss und Triebkraft**

$$J_P = \frac{\dot{m}_P}{\rho_P} = A \Delta p \quad \text{mit} \quad A = \frac{\varepsilon^3}{\eta (1 - \varepsilon)^2 S_{(V)}^2 2 \mu H}$$

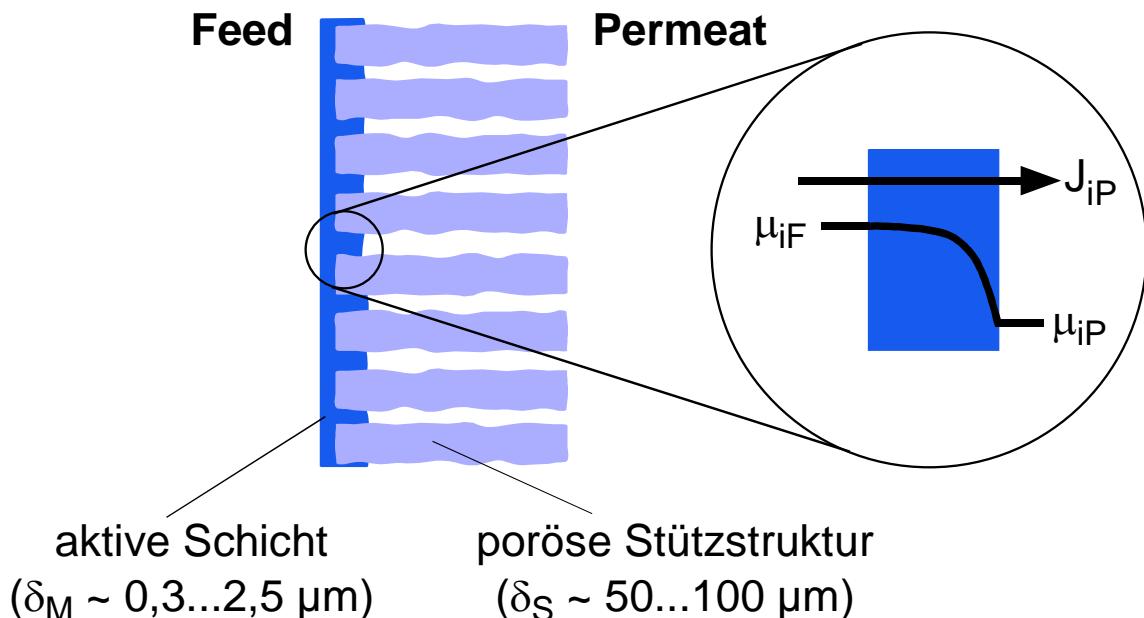
Folie 14

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
2 Modellierung des Stofftransports in Membranen

Technische Universität Berlin





Folie 15

Memranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse

2

Modellierung des Stofftransports in Membranen

nach Rautenbach 1997

Technische Universität Berlin



Lösungs-Diffusions-Modell (LDM)

LDM: In Polymermembran lösen sich Permeanden und diffundieren aufgrund des Gradienten ihrer treibenden Kraft

Annahmen:

- Membran homogene Schicht
- An den Phasengrenzen Membran/angrenzende Feed- bzw. Permeatphasen herrscht für jede Komponente chemisches Gleichgewicht
- Kopplungen zwischen den Partialflüssen werden vernachlässigt

Grundgleichung

Fluss = Konzentration · Beweglichkeit · Triebkraft

$$J_i = x_{iM} \cdot b_{d,i} \cdot \frac{\partial \mu_i}{\partial z}$$

Folie 16

Memranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse

2

Modellierung des Stofftransports in Membranen

Technische Universität Berlin



Stofftransport kann aus 5 Teilschritten bestehen:

1. **Diffusion** aus Zulaufphase an die Membranoberfläche
2. Selektive **Lösung** in dem Membranmaterial
3. Selektiver (diffusiver) **Transport** durch die Membran
4. **Desorption** auf der Permeatseite der Membran
5. **Diffusion** von der Membranoberfläche in den Kern der Permeatströmung

Geschwindigkeitsbestimmende(r) Schritt(e): 1, **3**, 5

Stoffübergangskoeffizient kann aus der Reihenschaltung der Widerstände bestimmt werden.

Folie 17

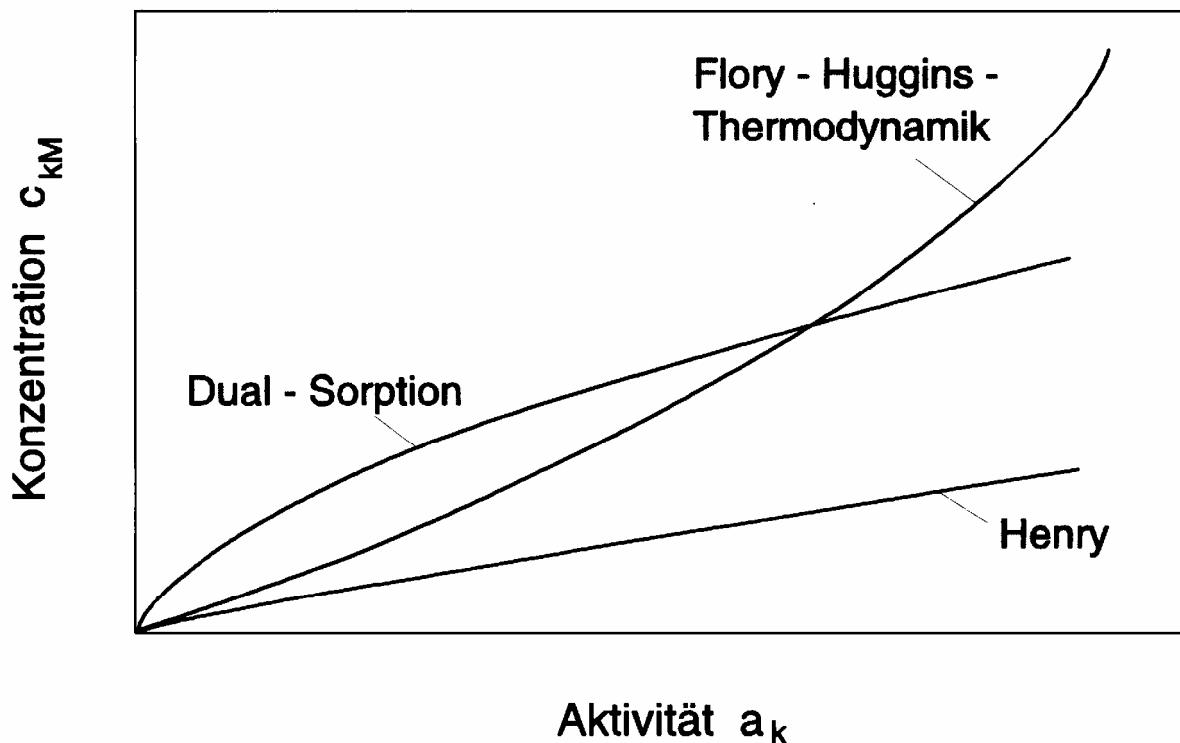
Gleichgewichtskonzentration-Sorption

Konzentration c_{kM} : Menge des von der Membran aufgenommenen Permeanden

Abhängig von

- Membraneigenschaften
 - Thermodynamische Randbedingungen
- Sorptionsansätze $c_{kM} = f(a_k)$ zur Beschreibung der Gleichgewichtskonzentration c_{kM} in Abhängigkeit von den Zustandsgrößen
- Druck
 - Temperatur
 - Zusammensetzung der Feedlösung

Folie 18



Folie 19

Memranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
2 Modellierung des Stofftransports in Membranen

Quelle: Rautenbach 1997

Technische Universität Berlin 

Beweglichkeit

Beweglichkeit $b_{d,kM}$: Maß für Bewegungsfreiheit eines Permeandmoleküls innerhalb des Polymers

Abhängig von

- Membraneigenschaften

Zusammenhang Beweglichkeit mit thermodynamischem Diffusionskoeffizienten (Nernst-Einstein-Gleichung)

$$D_{k0} = \mathfrak{R} T b_k$$

Erweiterte Diffusionsgleichung

Fickscher Ansatz

$$\dot{n}_k = -c_{kM} \cdot \frac{D_{kM,0}}{\mathfrak{R} T} \cdot \frac{\partial \mu_{kM}}{\partial z}$$

$$\dot{n}_k = -c \cdot D_{kM} \cdot \frac{\partial x_{kM}}{\partial z}$$

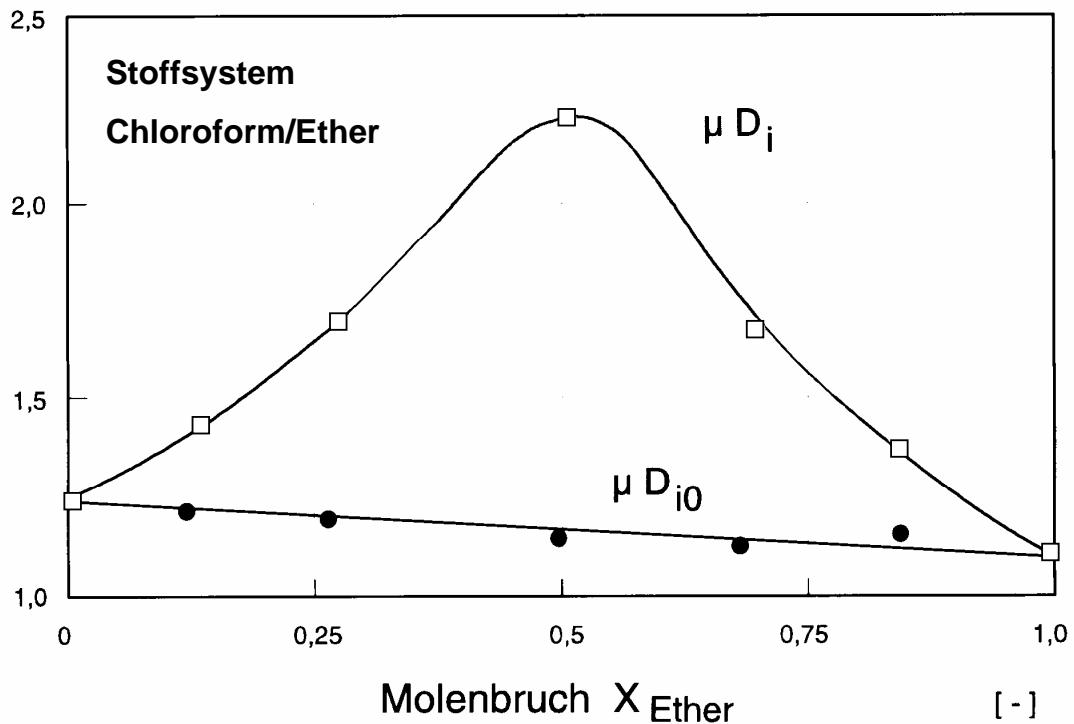
Nachteil Fickscher Ansatz: D_{kM} ist in nicht-idealen Systemen konzentrationsabhängig

Folie 20

Memranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
2 Modellierung des Stofftransports in Membranen

Technische Universität Berlin 



Quelle: Rautenbach 1997

Folie 21

Memranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse

2

Modellierung des Stofftransports in Membranen

Technische Universität Berlin



Anwendung LDM auf RO für Wasser/Salz-Systeme

Erweiterte Diffusionsgleichung

$$\dot{n}_k = -c_{kM} \cdot D_{kM,0} \cdot \left[\frac{\partial \ln a_{kM}}{\partial z} + \frac{\tilde{V}_k}{\mathfrak{R}T} \frac{\partial p_M}{\partial z} \right]$$

Wasser

Annahmen: $c_{WM} = \text{const.}$, $D_{WM,0} = \text{const.}$, chemisches Gleichgewicht an der Phasengrenze

$$J_w = \frac{\dot{m}_w}{\rho_w} = A (\Delta p - \Delta \pi_w)$$

A Membrankonstante

Salz

Annahmen: verdünnte Salzlösung: Druckterm vernachlässigbar
chemisches Gleichgewicht an der Phasengrenze

$$\dot{m}_S = B^* (w_{S,feed} - w_{S,Permeat}) = B (\rho_{S,Feed} - \rho_{S,Permeat}) \quad B, B^* \text{ Membrankonstanten}$$

Folie 22

Memranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse

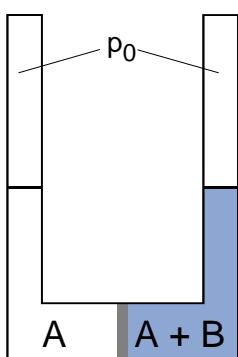
2

Modellierung des Stofftransports in Membranen

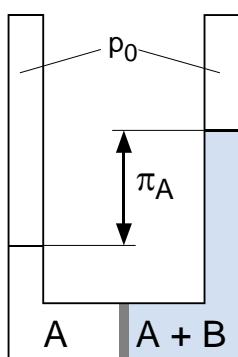
Technische Universität Berlin



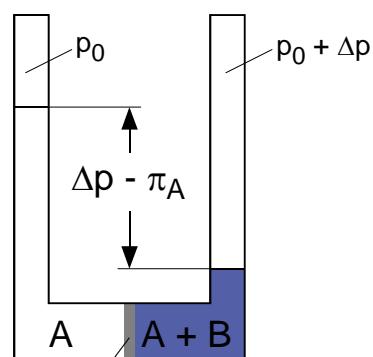
a) Anfangszustand



b) Gleichgewichtszustand



c) Umkehrosmose



A: Lösungsmittel
B: gelöste Komponente

Semipermeable
Membran

Folie 23

Osmotischer Druck

Definition des osmotischen Drucks

$$\pi_i = - \frac{\mathfrak{R} \cdot T}{V_i} \cdot \ln a_i$$

Verdünnte Systeme
van 't Hoff-Gleichung

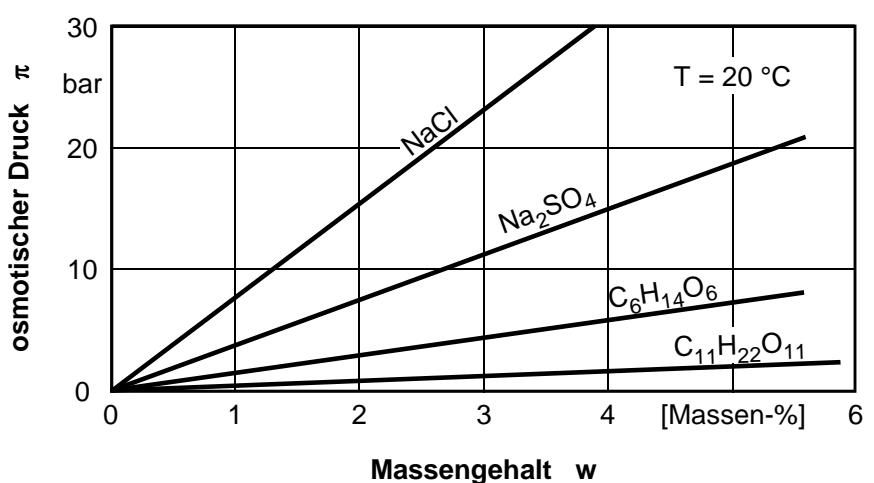
$$\pi_i = \mathfrak{R} \cdot T \cdot c_j$$

Höhere Konzentrationen

$$\pi_i = \mathfrak{R} T \cdot c_j + B c_j^2 + \dots$$

oder

$$\pi_i = a \cdot c_j^n$$



Folie 24

Wasserfluss durch die Membran

$$J_w = \frac{\dot{m}_w}{\rho_w} = A (\Delta p - \Delta \pi_w) \quad A \approx 3 \cdot 10^{-5} \dots 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h bar})$$

Gelöste Komponente

$$\dot{m}_S = B \Delta \rho_S \quad B \approx 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/h (NaCl)}$$

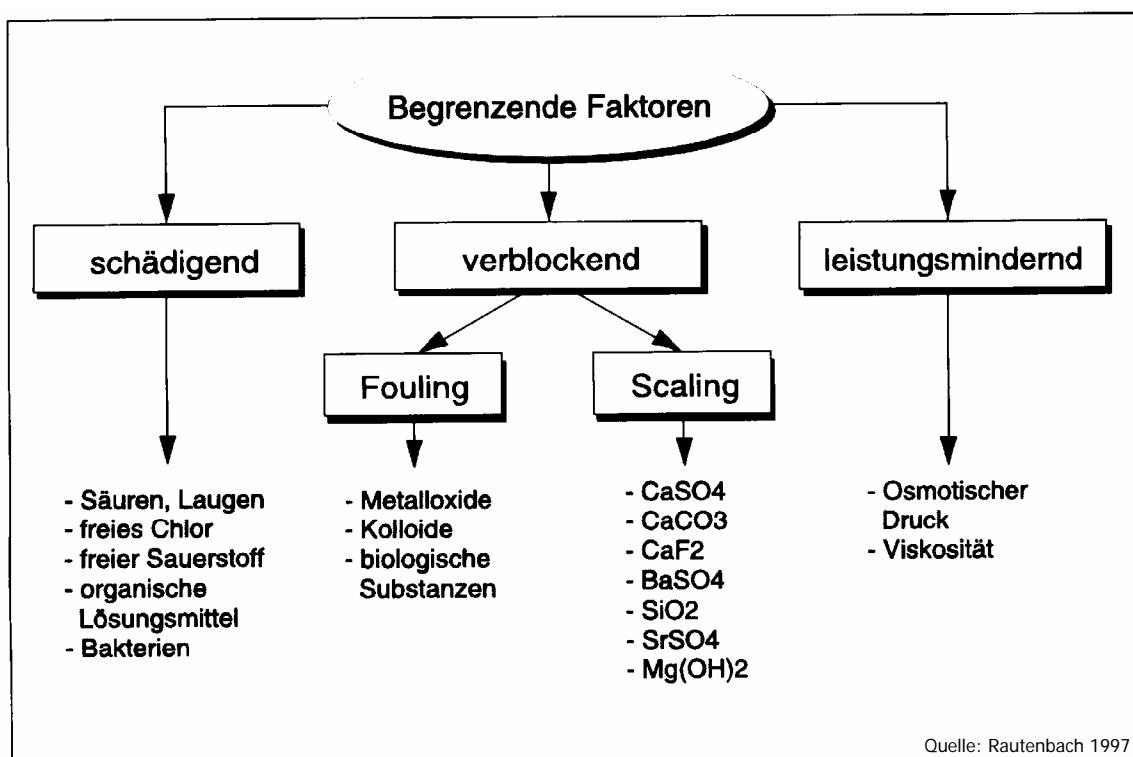
→ mit zunehmender transmembraner Druckdifferenz steigt Rückhalt

$$R = 1 - \frac{\rho_{S,Permeat}}{\rho_{S,Feed}} = \frac{A (\Delta p - \Delta \pi_w)}{A (\Delta p - \Delta \pi_w) + B}$$

$$\text{Grenzwert für } \Delta p \rightarrow \infty \quad \rightarrow \quad R = 1$$

Folie 25

Begrenzung der Umkehrosmose durch Störsubstanzen



Folie 26

Newtonische Medien (Platten- bzw. Rohrmodule)

	Laminare Strömung	Turbulente Strömung
Stoffübergang an die Membran	$\beta \sim \eta^{-2/3}$	$\beta \sim \eta^{-17/12}$
Druckverlust im Modul	$\Delta p \sim \eta$	$\Delta p \sim \eta^{1/4}$

Nicht-Newtonische Medien

Übernahme der Gesetzmäßigkeiten der Newtonschen Flüssigkeiten durch Bestimmung einer scheinbaren Viskosität, die geeignet aus der Fließkurve zu ermitteln ist

Folie 27

Memranverblockung durch Kristallisation (Scaling)

Aufgrund der selektiven Wirkung der Membran

- ➡ Aufkonzentrierung der Inhaltsstoffe an der Membran
- ➡ Überschreitung der Löslichkeitsgrenze (Scaling)

Vermeidung des Scaling durch

- Chemische Umwandlung, Entfernung oder Stabilisierung der Substanzen
- Begrenzung der Aufkonzentrierung ➡ an den kritischen Stellen (Modul- bzw. Anlagenausgang) wird Sättigungskonzentration sicher unterschritten

Folie 28

Deckschichtbildung durch suspendierte bzw. kolloidal gelöste Stoffe oder biologisches Wachstum

- Ursprünglicher Permeatfluss kann auch bei hohen Wandschubspannungen nicht mehr erreicht werden
- Praxisnahe Versuche mit Original Rohwasser und Originalmembran Strömungsverhältnisse müssen Anlagenbedingungen entsprechen

Vorbehandlungen zur Reduzierung von Fouling bei der Umkehrosmose

- Filtration im Sand- oder Mehrschichttiefbett evtl. einschließlich Flockung
- Feinfiltration mit Filterkerzen
- Mikro- oder Ultrafiltration
- Flotation

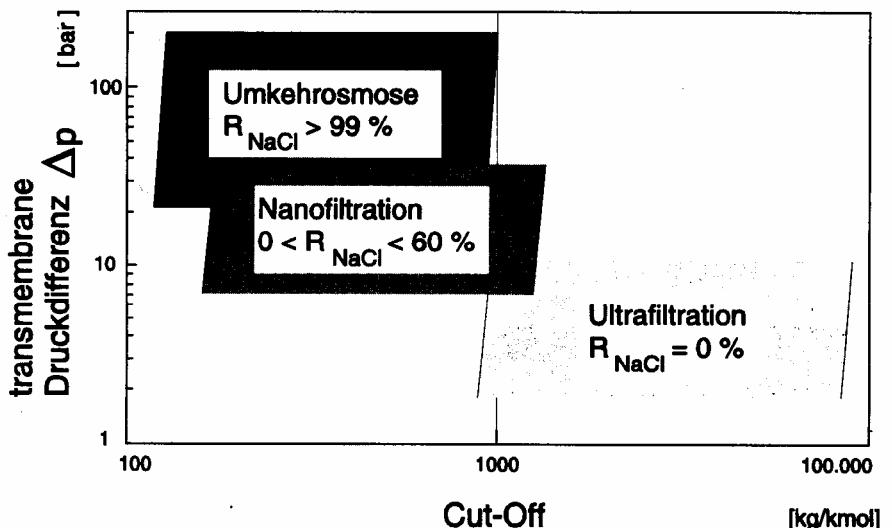
Folie 29

Zusammenfassung Umkehrosmose

Membranen:	Asymmetrisch, Kompositmembranen
Dicke:	Trägerschicht \approx 150 μm ; Deckschicht \approx 1 μm
Porengröße:	< 2 nm
Triebkraft:	Druck (Brackwasser 15...25 bar, Meerwasser 40...80 bar)
Trennprinzip:	Lösung-Diffusion
Membranmaterial:	Zellulosetriacetat, aromatische Polyamide
Hauptanwendungen:	- Entsalzung von Meer- und Brackwasser - Reinstwasser-Herstellung - Aufkonzentrierung von Fruchtsäften, Zuckern und Milch

Folie 30

- Rückhalt erst oberhalb $M = 200 \text{ kg/kmol}$, entsprechend ca. 1 nm
- Transmembrane Druckdifferenz $\Delta p = 5 \dots 30 \text{ bar}$
(low pressure reverse osmosis)
- Ionenselektivität: Permeabilität eines Salzes wird durch Wertigkeit des Anions bestimmt
(elektrische Effekte bedingt durch negative Festladungen)

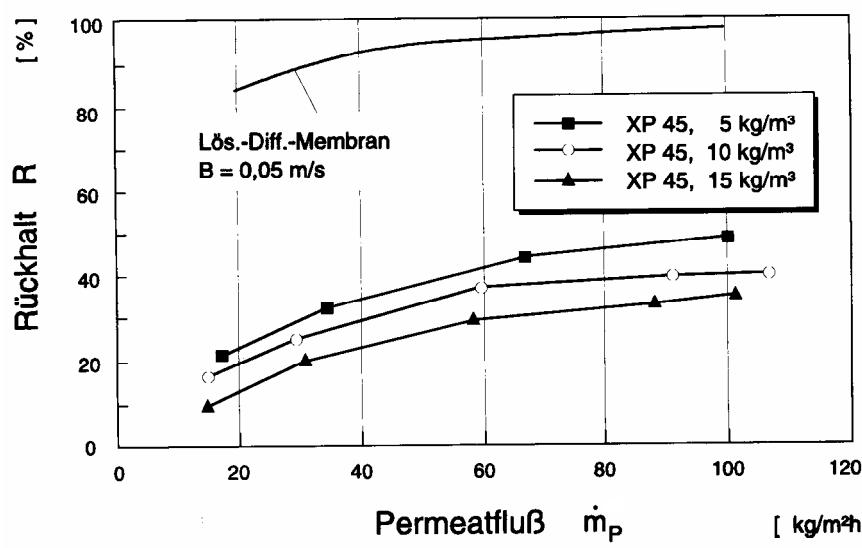


Folie 31

Zusammenhang Fluss und Rückhalt

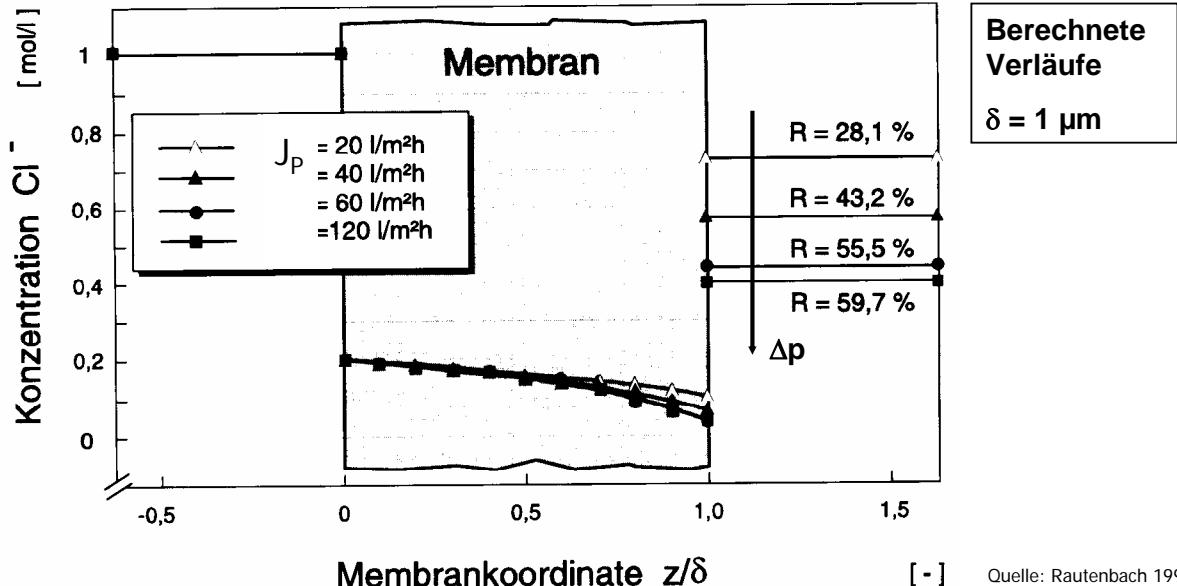
Bei der Nanofiltration gilt, dass der Rückhalt

- mit zunehmendem Permeatfluss bzw. Differenzdruck einem asymptotischen Grenzwert deutlich unterhalb 100% zustrebt (im Gegensatz zur RO), der von der Feedkonzentration abhängt und
- bei vorgegebenem Fluss mit zunehmender Konzentration fällt.



Folie 32

- Überlagerung von konvektivem und diffusivem Transports des Salzes
- Poreneintrittskonzentration durch Donnan-Gleichgewicht festgelegt (unabhängig vom transmembranen Fluss)



Folie 33

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

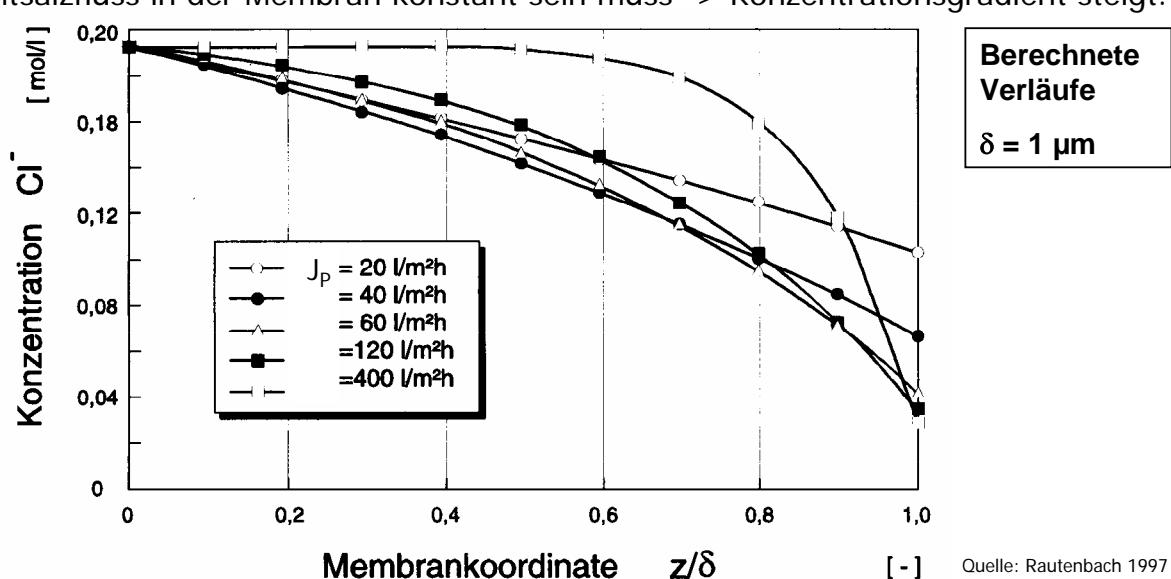
2 Grundlagen der Membranprozesse
4 Nanofiltration

[-] Quelle: Rautenbach 1997

Technische Universität Berlin 

Konzentrationsverläufe in der Membran

1. Eintrittskonzentration durch Gleichgewicht festgelegt
 2. Austrittskonzentration sinkt mit steigendem Flux
 3. Bei geringem Flux diffusiver Transport -> linearer Konzentrationsverlauf
 4. Bei merklichem Flux konvektiver Transport -> konvektiver Salzfluss nimmt ab (Konz. fällt mit Eindringtiefe).
- Da Gesamtsalzfluss in der Membran konstant sein muss -> Konzentrationsgradient steigt.



Folie 34

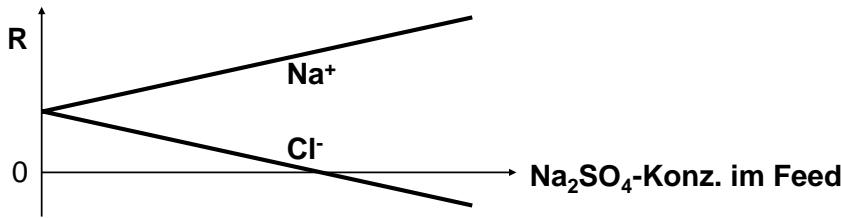
Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
4 Nanofiltration

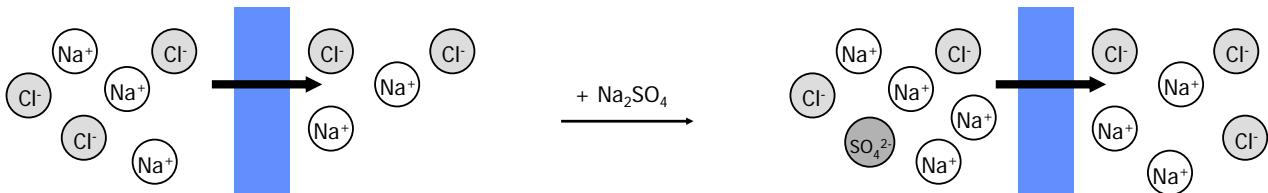
[-] Quelle: Rautenbach 1997

Technische Universität Berlin 

- bevorzugte Permeation (= geringerer, u.U. neg. Rückhalt) einwertiger Ionen
- tritt auf bei der NF von Lösungen, die ein- und mehrwertige Ionen enthalten
- z.B. bei Wasserenthärtung erwünscht, $\Delta\pi$ wird verringert



- hier elektrochem. Potenzial entscheidend: $\eta_j = \mu_j + z_j F \varphi$ (Einfluss el. Feld auf perm. Ionen; z_j Ladungszahl, F Faradaykonstante, φ inneres Potenzial der Phase)



- vergrößerte Differenz Na^+ -Konz. -> vermehrte Na^+ -Permeation -> zur Aufrechterhaltung der Elektroneutralität vermehrte Cl^- -Permeation

Folie 35

Zusammenfassung Nanofiltration

Membranen: Kompositmembranen

Dicke: Trägerschicht $\approx 150 \mu\text{m}$; Deckschicht $\approx 1 \mu\text{m}$

Porengröße: $< 2 \text{ nm}$

Triebkraft: Druck (10...25 bar)

Trennprinzip: Lösung-Diffusion

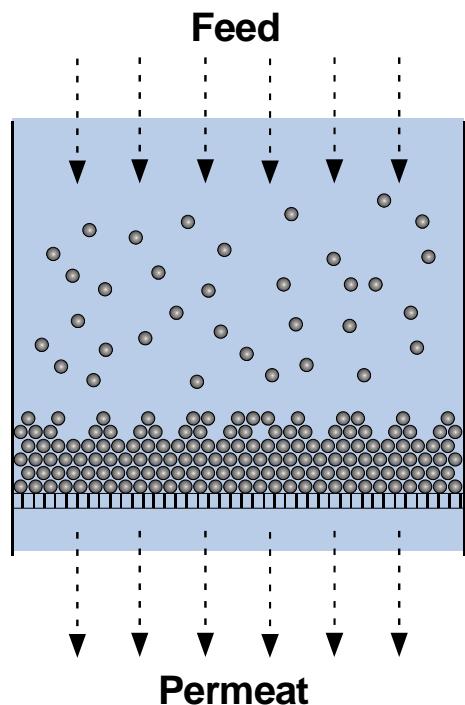
Membranmaterial: Polyamide

Hauptanwendungen:

- Entsalzung von Brackwasser
- Wasser Enthärtung
- Abwasser Behandlung
- Rückhalt von Farbstoffen (Textilindustrie)

Folie 36

orthogonale Durchströmung - Kuchenfiltration



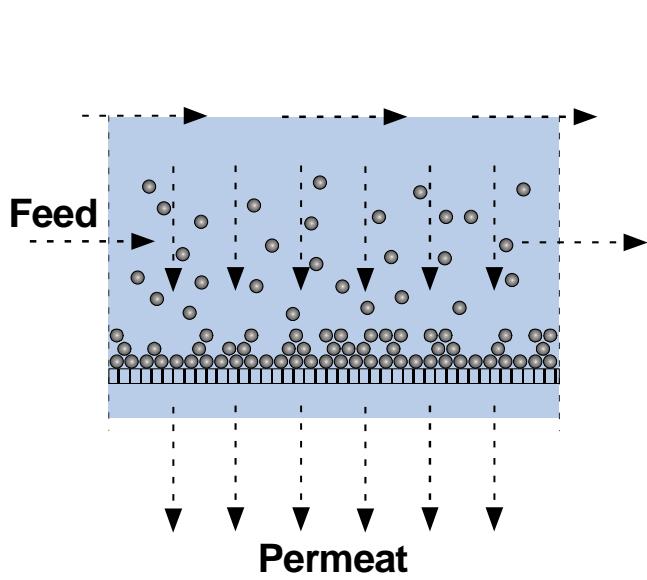
Folie 37

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
5 Ultrafiltration und Mikrofiltration

Dynamischer Betrieb (crossflow)

membranparallele Überströmung des Feeds

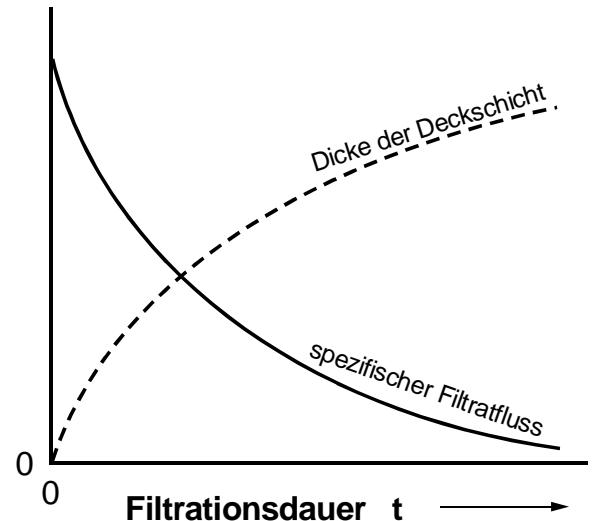


Folie 38

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

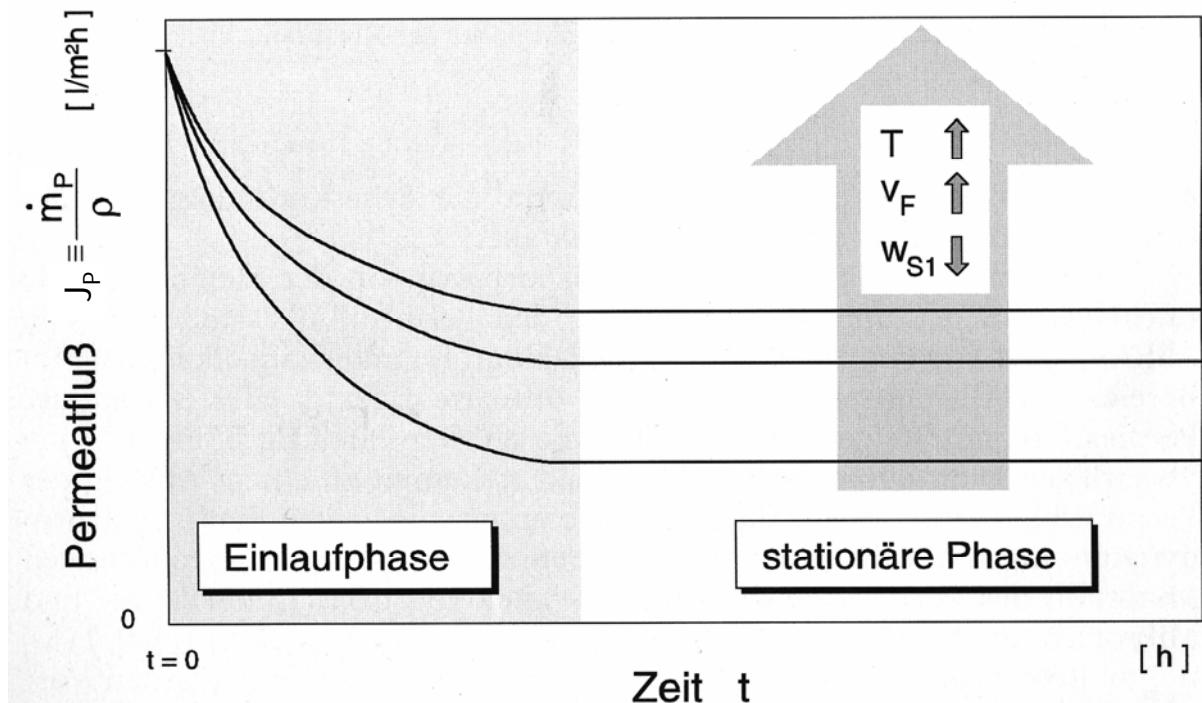
2 Grundlagen der Membranprozesse
5 Ultrafiltration und Mikrofiltration

- Geringe Konzentration abzutrennender Stoffe
- Abnahme des Permeatflusses durch steigende Deckschichtdicke
- Geringer spezifischer Energieverbrauch ($0,1 \dots 0,5 \text{ kWh/m}^3_{\text{Permeat}}$)
- Notwendige Spülvorgänge führen zu Verlusten von bereits filtriertem Rückspülwasser
→ Gesamtausbeute sinkt
- Chemische Reinigungen zur Wiederherstellung der Permeabilität
→ Minimierung wichtiges Optimierungsziel



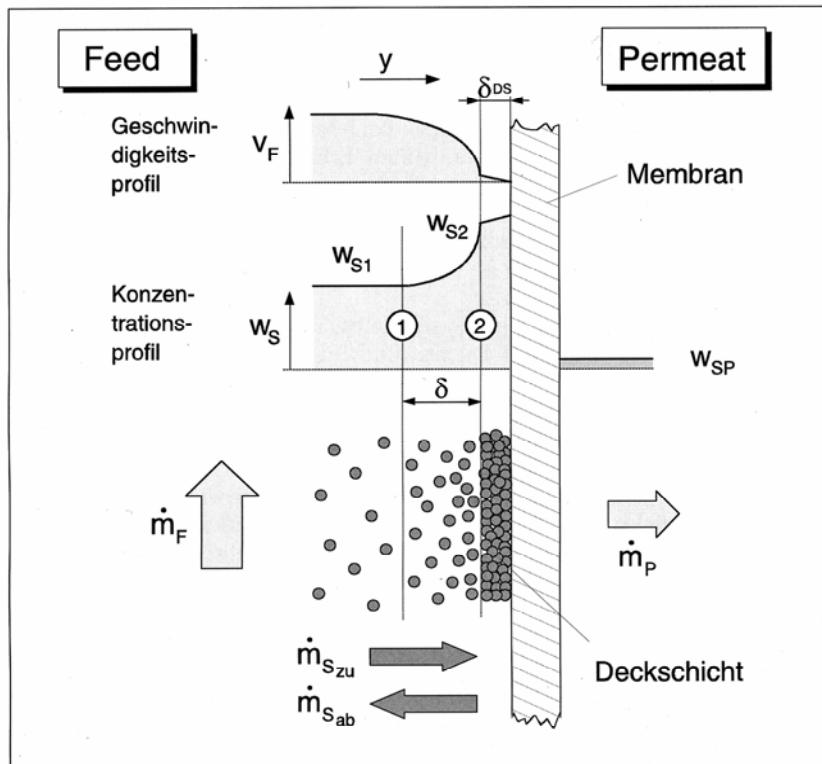
Folie 39

Zeitabh. Permeatfluss bei reversibler Deckschichtbildung



Folie 40

Geschwindigkeits- und Konzentrationsprofil vor der Membran



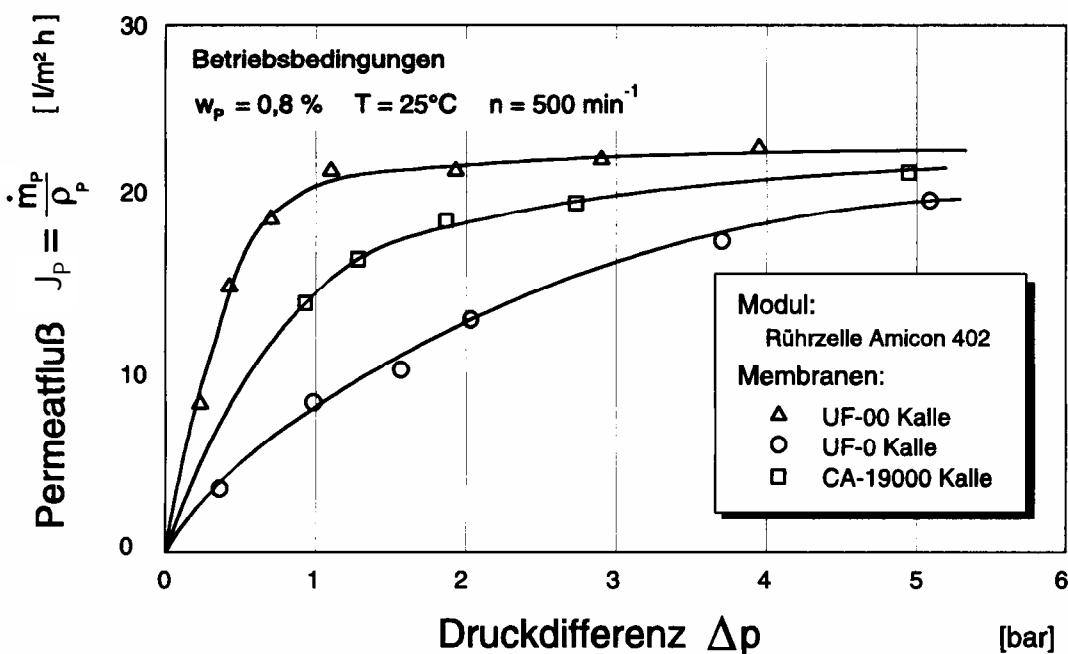
Quelle: Rautenbach 1997

Folie 41

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
5 Ultrafiltration und Mikrofiltration

Deckschichtkontrollierter Stoffaustausch



Permeatfluss stellt sich unabhängig von der transmembranen Druckdifferenz und dem Membrantyp auf einen konstanten Endwert ein

Ursache: z.B. Ausfall gelöster Inhaltsstoffe

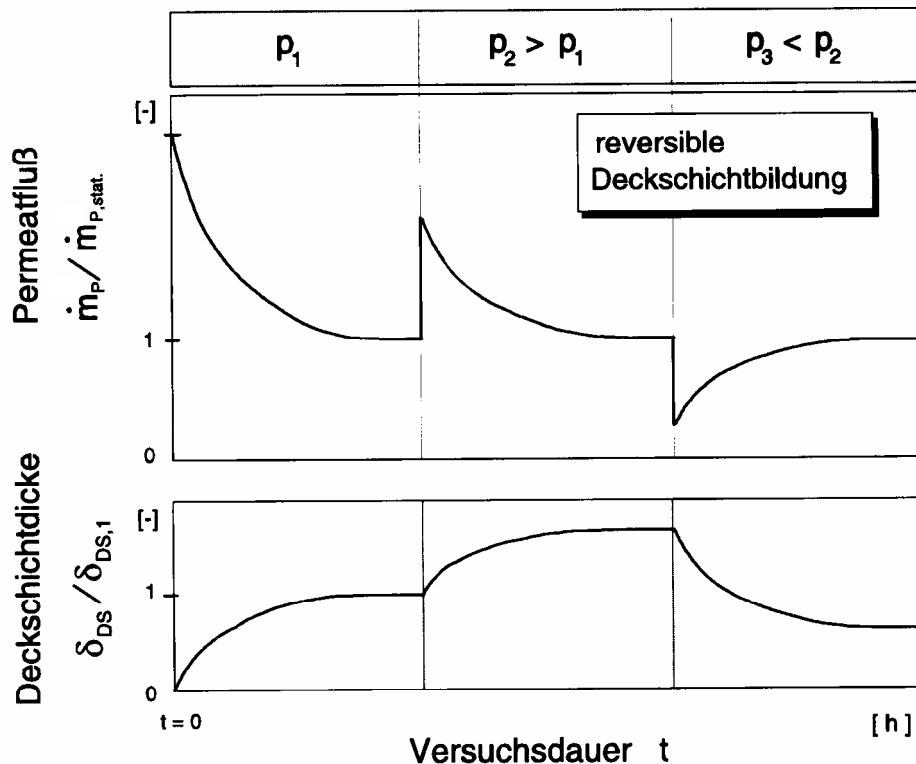
Folie 42

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
5 Ultrafiltration und Mikrofiltration

Quelle: Rautenbach 1997

Permeatfluss und Deckschichtdicke bei deckschichtkontrolliertem Stoffaustausch



Dauerhafte
Flusssteigerung
durch Druckerhöhung
ist nicht möglich

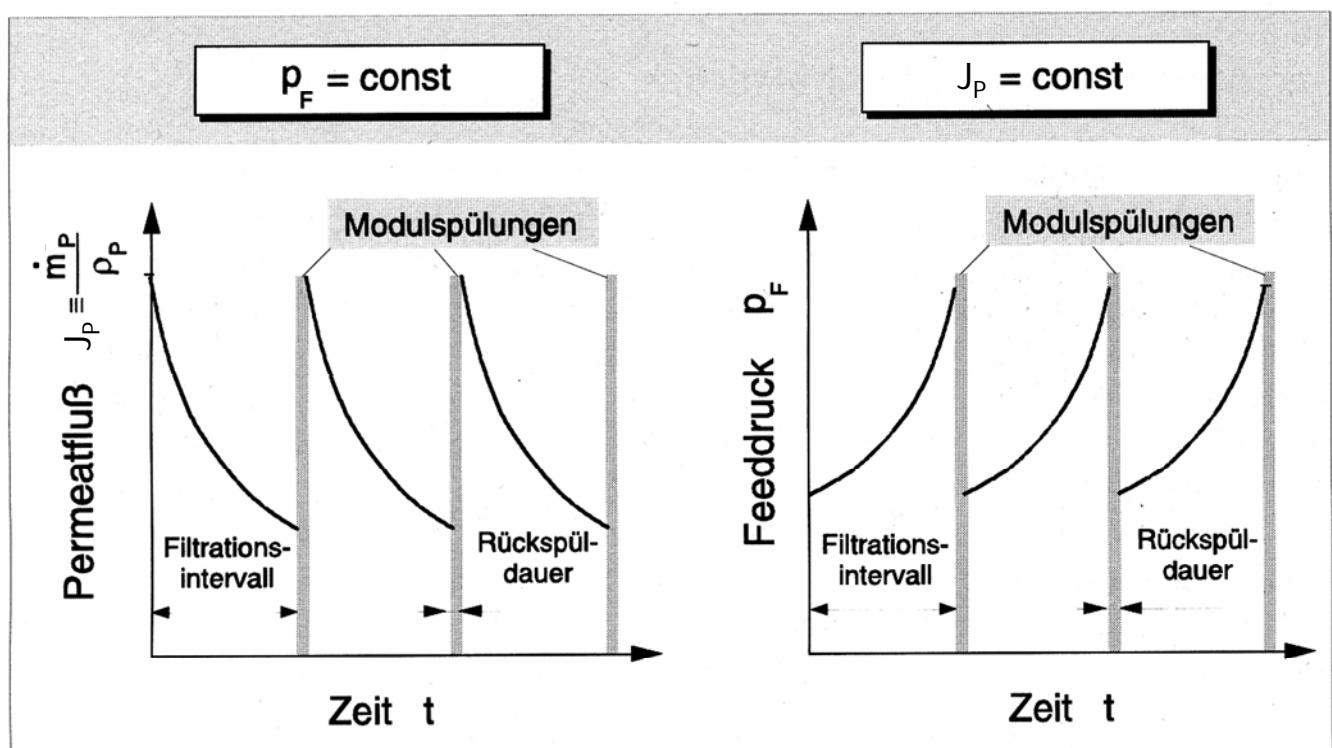
Folie 43

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
5 Ultrafiltration und Mikrofiltration

Quelle: Rautenbach 1997

Filtrationsintervalle und Rückspülungen zum Deckschichtabtrag



Folie 44

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
5 Ultrafiltration und Mikrofiltration

Quelle: Rautenbach 1997

Zusammenhang zwischen Filtratfluss und Widerständen in Deckschicht und Membran

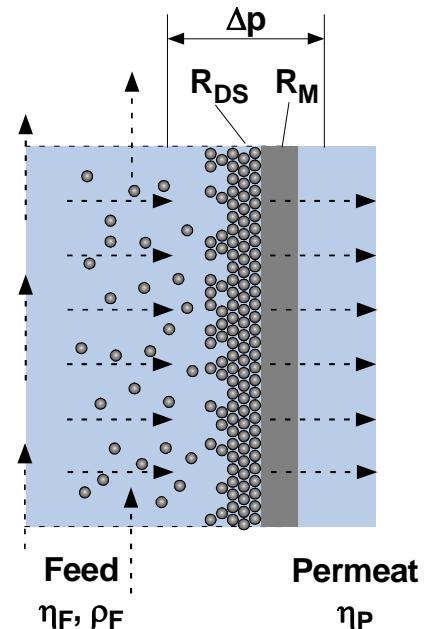
$$J_P = \frac{\Delta p}{\eta_P (R_M + R_{DS})}$$

Entscheidende Größe: Strömungswiderstand der Deckschicht R_{DS} , empirische Beziehung

$$R_{DS} = \frac{\eta_F w_{S1}}{\tau_w \rho_F} F_{(\Delta p)} \quad \tau_w : \text{Wandschubspannung}$$

Anpassung an Messwerte durch differenzdruckabhängigen Faktor $F_{(\Delta p)}$

Membranwiderstand R_M vielfach vernachlässigbar



Folie 45

Diffusionsmodell

Aufgrund der Membranrückhaltung entsteht Konzentrationsüberhöhung der abgetrennten Komp. → Triebkraft für einen diffusiven Rücktransport

Aus der Massenbilanz folgt für den Flux bei vollständigem Rückhalt ($w_{SP} = 0$):

$$J_P = \frac{\dot{m}_P}{\rho_F} = -\beta \ln \left(\frac{w_{S1}}{w_{S2}} \right)$$

Filmtheorie liefert für Konzentrationsgrenzschicht (Dicke δ):

$$\beta \equiv \frac{D_{SW}}{\delta}$$

Stoffübergangsbeziehungen

$$Sh = \frac{\beta d_h}{D_{SW}} = C Re^a Sc^n$$

Diffusionskoeffizienten für Partikeln und Kolloide (Stokes-Einstein-Beziehung):

$$D = \frac{k_B T}{3 \pi \eta d_p} \quad \text{Ursache: Brownsche Molekularbewegung}$$

Folie 46

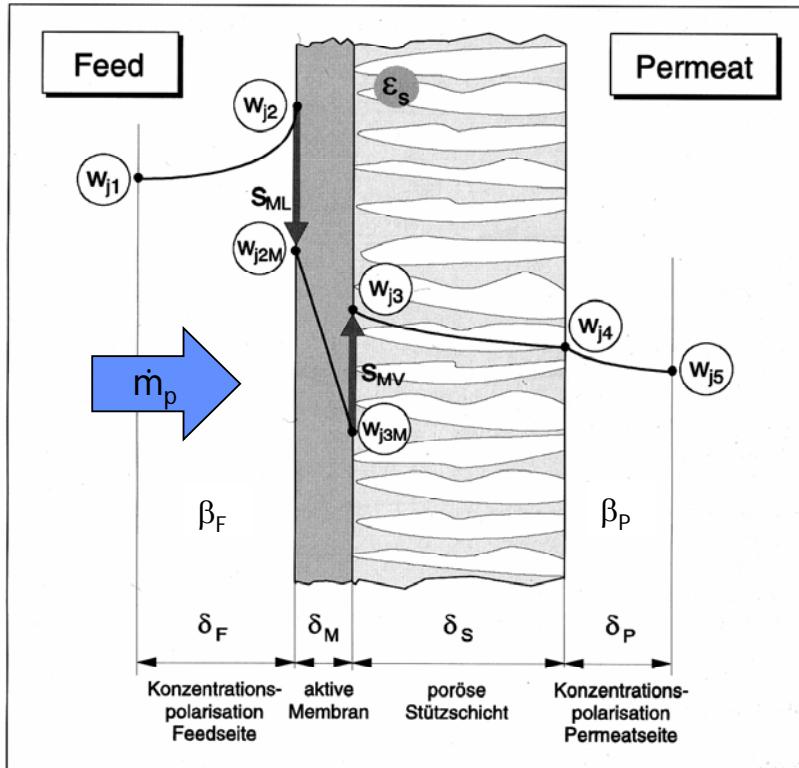
Membranen:	(a)symmetrische Porenmembranen
Dicke:	$\approx 10\ldots 150 \mu\text{m}$
Porengröße:	$\approx 0,05\ldots 10 \mu\text{m}$
Triebkraft:	Druck ($< 2 \text{ bar}$)
Trennprinzip:	Filter
Membranmaterial:	Polymere, Keramik
Hauptanwendungen:	<ul style="list-style-type: none">- Sterilisierung (Lebensmittel, pharmazeutische Produkte)- Trübstoffentfernung- Membranbioreaktoren- Abwasserbehandlung

Folie 47

Zusammenfassung Ultrafiltration

Membranen:	asymmetrische Porenmembranen
Dicke:	$\approx 150 \mu\text{m}$
Porengröße:	$\approx 1\ldots 100 \text{ nm}$
Triebkraft:	Druck ($1\ldots 10 \text{ bar}$)
Trennprinzip:	Filter
Membranmaterial:	Polymere (u.a. Polysulfone, Polyacrylnitril) Keramik (u.a. Zirkonoxid, Aluminiumoxid)
Hauptanwendungen:	<ul style="list-style-type: none">- Lebensmittel (Kartoffelstärke und Proteine)- Milchprodukte (Milch, Molke, Käseherstellung)- Pharmazeutika (Enzyme, Antibiotika)- Automobilindustrie (Lackrückgewinnung)- Abwasserbehandlung

Folie 48



Quelle: Rautenbach 1997

Folie 49

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
6 Triebkraftmindernde Effekte

Technische Universität Berlin 

Konzentrationspolarisation

Konzentrationspolarisation: Konzentrationsüberhöhung der zurückgehaltenen Komponente

- Verschlechterung des Trennergebnisses
- Triebkraft der bevorzugt permeierenden Komponente wird verringert
- Triebkraft der zurückgehaltenen Komponente wird erhöht

Zwei Fälle des Stoffaustauschs

- **Membrankontrollierter** Stoffaustausch (Lösungs-Diffusions-Membranen)
- **Deckschichtkontrollierter** Stoffaustausch (Porenmembranen)
- Feedseitig Konzentrationsprofil, das durch Strömungsverhältnisse entlang der Membran beeinflusst werden kann.

Folie 50

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
6 Triebkraftmindernde Effekte

Technische Universität Berlin 

Stoffströme in der feedseitigen Konzentrationsgrenzschicht

Aus der Stoffbilanz folgt:

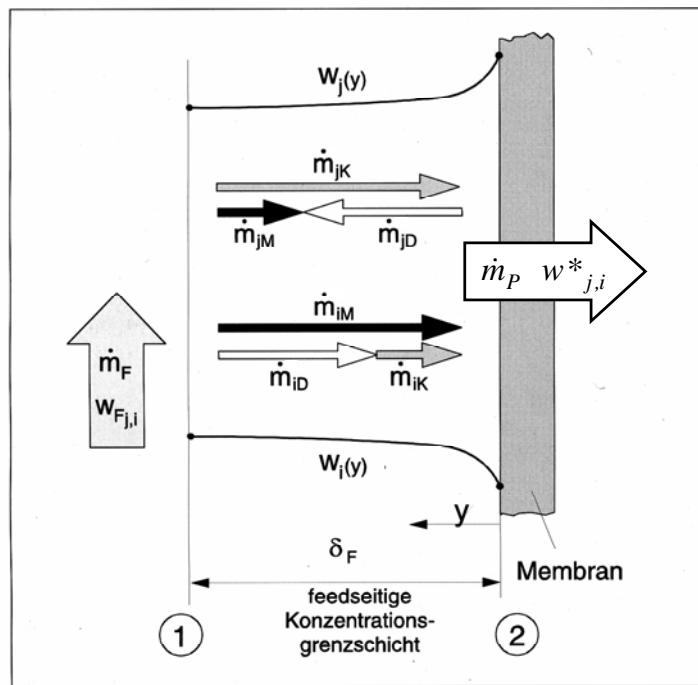
$$\frac{w_{j1} - w_j^*}{w_{j2} - w_j^*} = \exp\left(-\frac{\dot{m}_P \delta_F}{\rho_F D_{ij}}\right) = \exp\left(-\frac{\dot{m}_P}{\rho_F \beta_F}\right)$$

(konst. Stoffwerte, ebenes System)

w_j^* bezeichnet den Massenanteil des örtlich produzierten Permeats:

$$w_j^* = \frac{\dot{m}_{jP}}{\dot{m}_{jP} + \dot{m}_{iP}}$$

Beispiel: Binäres System
i: permeierende Komp.; j: zurückgehaltene K.



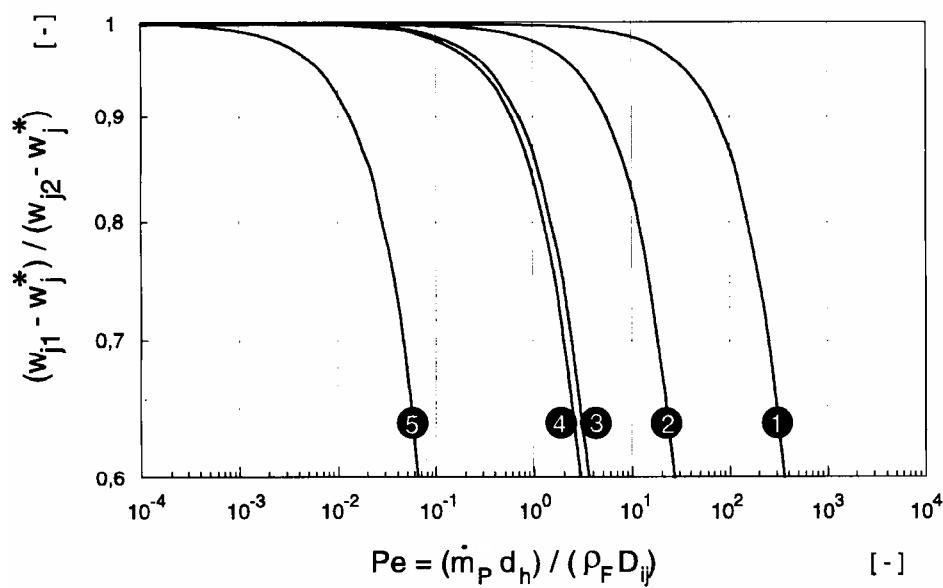
Quelle: Rautenbach 1997

Folie 51

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
6 Triebkraftmindernde Effekte

Konzentrationspolarisation auf der Feedseite von Membranmodulen



Modul	Re [-]	Sc [-]	d_h [mm]
① — RO, Rohr ~	24000	740	12
② - - - RO, Kissen ~	1336	740	2
③ PV, Platten ~	100	260	1,4
⑤ - - - GP, Hohlfaser ~	197	12	0,19
④ - - - GP, Kapillar ~	10	0,76	0,1

Folie 52

Membranverfahren in der industriellen und kommunalen Abwassertechnik – A. Drews

2 Grundlagen der Membranprozesse
6 Triebkraftmindernde Effekte

Technische Möglichkeiten

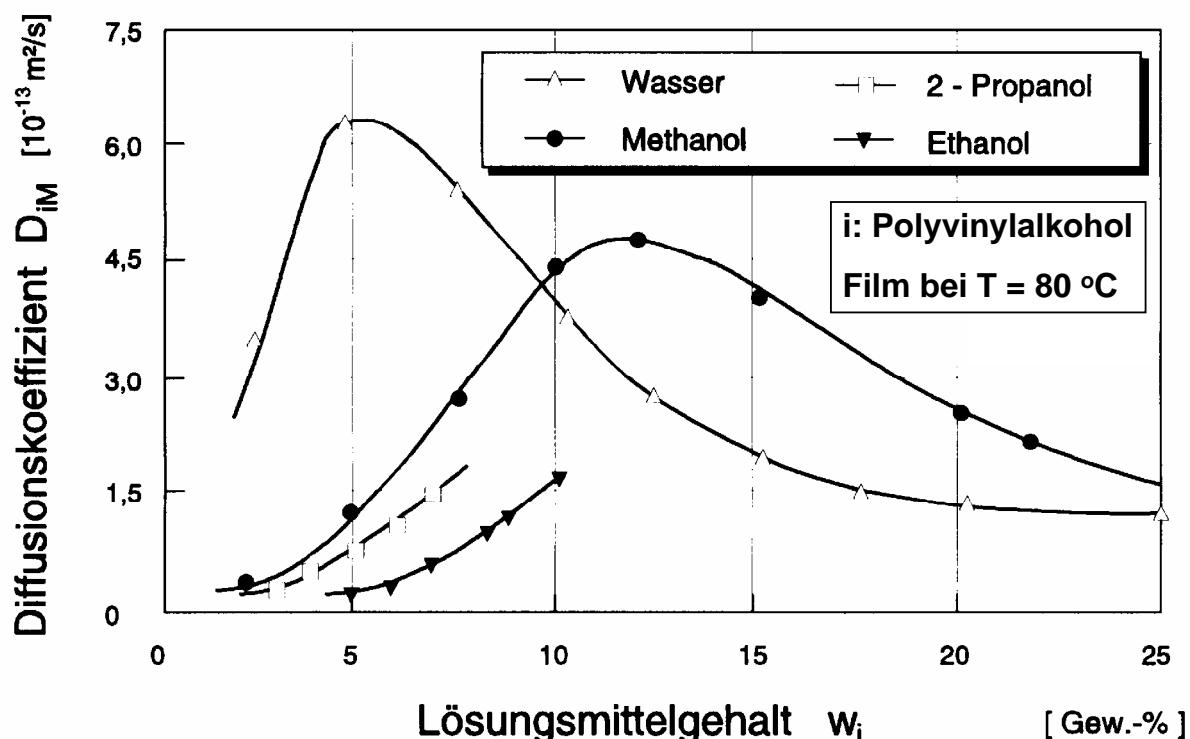
- Erhöhte Strömungsgeschwindigkeit entlang der Membran
- Erhöhung der Temperatur (Beeinflussung der Viskosität bzw. Diffusion)
- Pulsierende Strömung
- Einbauten in den Membrankanal (Kanten, Mischelemente, Verdrängungskörper)

Nachteile dieser Maßnahmen

- Erhöhung der Investitions- bzw. Betriebskosten
- Erschwerung der Montage
- Erhöhung von Druckverlusten

Folie 53

Konzentrationsabhängigkeit des Fickschen Diffusionskoeffizienten



Quelle: Rautenbach 1997

Folie 54

Transport lässt sich allgemein über die laminare Durchströmung eines Haufwerks beschreiben, damit entsteht der Transport allein aufgrund der Druckdifferenz. Der osmotische Druck ist vernachlässigbar.

Überschlagsrechnung:

$$\pi_i = \mathfrak{R} \cdot T \cdot c_j = \mathfrak{R} \cdot T \frac{\rho_j}{\tilde{M}}$$

Für den Bereich der UF gilt: $1 \text{ ppm} < \rho_s < 1.000 \text{ ppm}$

$$2,5 \cdot 10^{-8} \text{ bar} < \pi < 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ bar}$$

Arbeitsbereich der Ultrafiltration: $2 \text{ bar} < \Delta P < 10 \text{ bar}$