

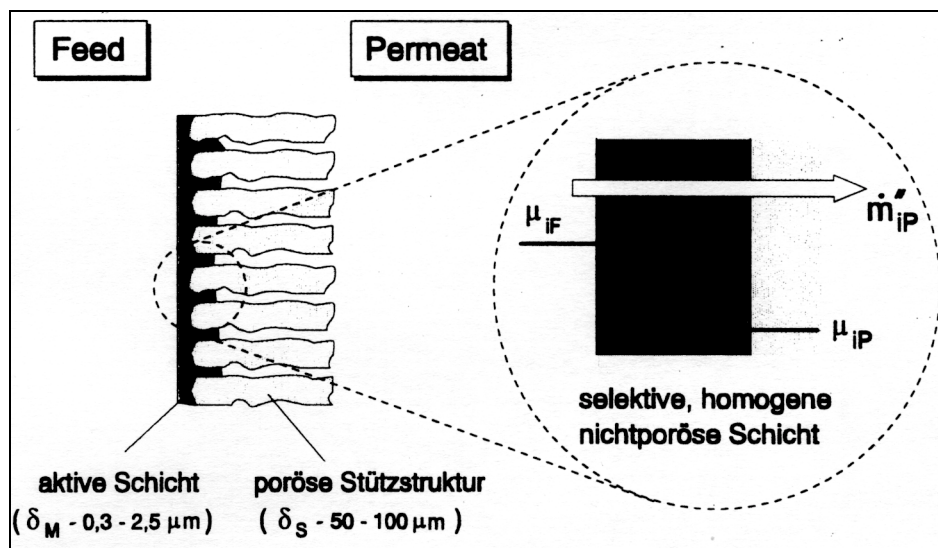
### 3.2.2 Lösungs-Diffusions-Modell

Liegen die Molmassen der zu trennenden Stoffe sehr nahe beieinander, wie beispielsweise bei Umkehrosmoseanwendungen, bei der die Trennung von Wasser und anorganischen Ionen im Vordergrund steht, reicht das Porenmodell als Erklärung nicht aus.

Die Selektivität und Semipermeabilität von Umkehrosmosemembranen läßt sich daher treffender durch das Lösungs-Diffusions-Modell (LDM) beschreiben (REID 1972).

Hierbei werden asymmetrische sogenannte Lösungs-Diffusions-Membranen als Zwei-Zonen Modell angesehen. Für die Trenncharakteristik verantwortlich ist hierbei eine porenfreie Lösungs-Diffusionsschicht während die poröse Stützschicht lediglich zur Stabilisierung bzw. als Trägermaterial für die aktive Lösungs-Diffusionsschicht dient.

**Abb. 4:** Model einer Lösungs-Diffusions-Membran (RAUTENBACH 1996)



Das Lösungs-Diffusions-Modell sieht die Polymermembran wie eine reale Flüssigkeit, in der sich die permeierenden Stoffe lösen und diffusiv entlang des Gradienten ihrer treibenden Kraft transportiert werden. Geht man von rein diffusivem Transport durch die Membran aus, so lautet die allgemeine Formel der Transportgleichung nach dem LDM

$$\text{Fluß} = \text{Konzentration} * \text{Beweglichkeit} * \text{Triebkraft}.$$

Danach ist der Fluß einer Komponente durch eine Membran gleich dem Produkt aus Konzentration dieser Komponente in der Polymerphase, Mobilität und der Triebkraft für den molekularen Transport.

Die Mobilität ist hierbei ein Maß für die Bewegungsfreiheit eines Premeandmoleküls innerhalb des Polymers und im wesentlichen abhängig von den Membraneigenschaften. Die Konzentration bezieht sich auf die Menge des von der Membran aufgenommen Permeanden und ist von den Membraneigenschaften sowie den thermodynamischen Bedingungen abhängig. Die Triebkraft ist abhängig von Temperatur, Druck und Konzentration in den beiden äußeren Phasen der Polymerschicht und stellt damit eine Prozeßvariable dar.

Der Gradient des chemischen Potentials in der Membranphase stellt somit die treibende Kraft für den Stofftransport dar, wobei der Fluß nur in Richtung abnehmenden Potentials stattfindet. Die Differenz der chemischen Potentiale einer Komponente zu beiden Seiten der Membran ist jedoch im Fall der zurückgehaltenen Komponente immer größer als die der bevorzugt permeierenden Komponente.

Unter der Annahme, daß die Gesamtkonzentration in der Membran als Summe der Konzentrationen an gelösten Komponenten und der Konzentration des Wassers, konstant ist, können bei der Trennung von organisch/wäßrigen Lösungen, zur Berechnung der Partialflüsse des Wassers und der organischen Komponente die Formeln

$$m''_w = A^* \times \left(1 - \frac{C_{i,M}}{C_{ges,M}}\right) \times (\Delta p - \Delta \pi_w)$$

$$m''_i = B^* \times \frac{C_{i,M}}{C_{ges,M}} \times (\Delta p - \Delta \pi_i)$$

herangezogen werden.

Zeichen	Dimension	Bedeutung
$m''_w$	kg/m <sup>2</sup> s	flächenspez. Massenstrom Wasser
$m''_i$	kg/m <sup>2</sup> s	flächenspez. Massenstrom Komponente
$C_{i,M}$	kmol/m <sup>3</sup>	Molenkonzentration der Komponente i.d. Membran
$C_{ges,M}$	kmol/m <sup>3</sup>	Molenkonzentration gesamt i. d. Membran
$\Delta p$	bar	hydrostatische Druckdifferenz
$\Delta \pi_w$	bar	osmot. Druckdifferenz (Wasser)
$\Delta \pi_i$	bar	osmot. Druckdifferenz (Komponente)
$A^*$	kg/m <sup>2</sup> s bar	Membrankonstante (Wasserfluß)
$B^*$	kg/m <sup>2</sup> s bar	Membrankonstante (Salzfluß)

An den Gleichungen wird bereits die Bedeutung der Druckdifferenzen als Prozessvariable deutlich. Die Modellparametern  $A^*$  und  $B^*$  können im interessierenden Arbeitsbereich näherungsweise als konstant angesehen werden.

Bei der Anwendung der Gleichungen müssen daher diese Parameter experimentell mit der zur Diskussion stehenden Membran und dem entsprechenden Stoffgemisch ermittelt werden.

Das Konzentrationsverhältnis an organischen Komponenten zur Gesamtkonzentration an permeierenden Komponenten in der Membran gibt im wesentlichen das Sorptionsverhalten der Membran wieder und kann mit Hilfe geeigneter Sorptionsisothermen in Abhängigkeit von der Feedkonzentration rechnerisch ermittelt werden.

Trotz der Unterschiedlichkeit der einzelnen Membranverfahren in der Prozeßführung und ihren Einsatzgebieten läßt sich somit eine einheitliche Darstellung für den Stofftransport in der Membran finden. Bei der Umkehrosmose können derartige halbempirische Transportgleichungen abgeleitet werden (RAUTENBACH 1996).

### **3.3 Triebkraftmindernde Effekte**

Bei alleiniger Betrachtung der beschriebenen Transportmodelle, die lediglich den Stofftransport in der aktiven Membran berücksichtigen, würde die Leistung bei Membrantrennverfahren überschätzt werden. In der praktischen Anwendung treten neben dem eigentlichen Transportwiderstand der aktiven Membran weitere Transportwiderstände auf, die sowohl zu Leistungseinbußen als auch zu Veränderungen der Selektivität führen.

Hierbei sind folgende lokalen Transportwiderstände zu nennen:

- Druckverluste in Feed und Permeat (Triebkraftverluste)
- Konzentrationspolarisation auf der Seite der Rohmischung (Feedseite)
- die Konzentrationsprofile in der porösen Stützschrift asymmetrischer Kompositmembranen
- Druckverluste bei der Durchströmung der porösen Stützschrift
- die Konzentrationspolarisation auf der Permeatseite

Während bei der Umkehrosmose die Druckverluste bei der Durchströmung der Stützschrift und die Konzentrationspolarisation auf der Permeatseite wegen ihres geringen Einflusses vernachlässigt werden können, haben die feed- und permeatseitigen Druckverluste sowie die dort auftretenden Konzentrationspolarisationen einen großen Einfluß auf den Stofftransport (RAUTENBACH 1996).

### 3.3.1 Druckverluste in Feed und Permeat

Die Triebkraft für eine durch eine Membran permeierende Komponente einer Mischung ist bei der Umkehrosmose ausschließlich die Differenz des chemischen Potentials dieser Komponente zu den beiden Seiten der Membran. Die für die Triebkraft hergeleitete Beziehung

$$\Delta\mu = \sum_i^o [(p_F - p_P) - (\pi_{iF} - \pi_{iP})]$$

$$= \sum_i^o (\Delta p - \Delta\pi_i)$$

Zeichen	Dimension	Bedeutung
$\mu$	kJ/mol	chemisches Potential
$\sum_i^o$	m <sup>3</sup> /kmol	partiell molares Volumen
$p_F$	bar	Feeddruck
$p_P$	bar	Permeatdruck
$\pi_{iF}$	bar	osmotischer Druck der Komponente i feedseitig
$\pi_{iP}$	bar	osmotischer Druck der Komponente i permeatseitig

läßt daher erkennen, daß durch Druckverluste sowohl auf der Feed- als auch auf der Permeatseite der Membran lokale Verschiebungen der Druckdifferenzen auftreten und die Triebkraft negativ beeinflussen können. D.h. beispielsweise, je größer der Druckverlust auf der Feedseite (abhängig von der Modulbauart und -geometrie) bei gleichbleibenden Bedingungen auf der Permeatseite, desto geringer wird die partielle Triebkraft am Ende der Laufstrecke über die Membran.

### 3.3.2 Feedseitige Konzentrationspolarisation

Zunächst werden alle Komponenten einer zu trennenden Mischung entsprechend dem Permeatfluß konvektiv und diffusiv aus dem Kern der Strömung an die Membranoberfläche transportiert. Durch die Selektivität der Membran steigt jedoch die Konzentration der zurückgehaltenen Komponenten an der Membranoberfläche in Abhängigkeit von dem Permeatstrom an (Konzentrationsüberhöhung). Dadurch entsteht gleichzeitig ein entsprechender Konzentrationsabfall der bevorzugt permeierenden Komponente. Diesen negative Konzentrationsgradient bezeichnet man als Konzentrationspolarisation.

Im stationären Zustand müssen diese Komponenten bei derartigen Konzentrationsprofilen in den Kern der Strömung zurücktransportiert werden. Da die feedseitige Strömung in unmittelbarer Nähe der Membran laminar ist, kann dieser Rücktransport nur diffusiv erfolgen.

Die Konzentrationspolarisation führt somit zu Verschlechterung des Trennergebnisses, da die Triebkraft d.h. der Fluß der bevorzugt permeierenden Komponente verringert und die Qualität des Permeats verschlechtert wird.

Bei geringen Permeatflüssen ist die Konzentrationsüberhöhung ebenfalls gering, so daß auch in unmittelbarer Nähe der Membran alle Komponenten der Mischung in der Regel noch in gelöster Form vorliegen. Hier überwiegt der Membranwiderstand und man spricht daher von einem membrankontrollierten Stoffaustausch.

Bei hohen Permeatflüssen die häufiger bei Porenmembranen in der Ultra- und Mikrofiltration vorkommen, zeigt sich in der Regel eine starke feedseitige Konzentrationspolarisation. Die zurückgehaltenen Komponenten können in diesem Fall ihre Grenzkonzentration überschreiten. Es kommt dann zur Ausfällung (Kristallisation, Scaling) oder zum sogenannten kolloidalen Fouling d.h. die zurückgehaltenen Stoffe bilden eine Deckschicht auf der Membranoberfläche. In diesem Fall ist das System Deckschicht/Membran leistungsbestimmend, was soweit führen kann, daß die Membranwiderstände gegenüber dem Deckschichtwiderstand vernachlässigt werden können. Man spricht dann von einem deckschichtkontrollierten Stoffaustausch.

In beiden beschriebenen Fällen kann das Konzentrationsprofil durch die Strömungsführung entlang der Membran beeinflusst werden.

### **3.3.3 Konzentrationspolarisation in der porösen Stützschrift**

Analog zur Konzentrationspolarisation auf der Feedseite, hat das sich an der Grenze zwischen der aktiven Membranschicht und der porösen Stützschrift einstellende Konzentrationsprofil auf die permeatseitige Triebkraft einen Einfluß. Je nach Strömungsführung von Feed und Permeat im Modul kann die örtliche Konzentration im Permeatkanal direkt unterhalb der Membran selbst stark von der dort produzierten Permeatqualität abweichen.

Ist die Konzentration des örtlich anfallenden Permeates höher als diejenige im Permeatkanal, so wirkt die poröse Stützschrift als starke Diffusionsbarriere und behindert somit den Stoffaustausch (RAUTENBACH 1996).

## **3.4 Das Wickelmodul**

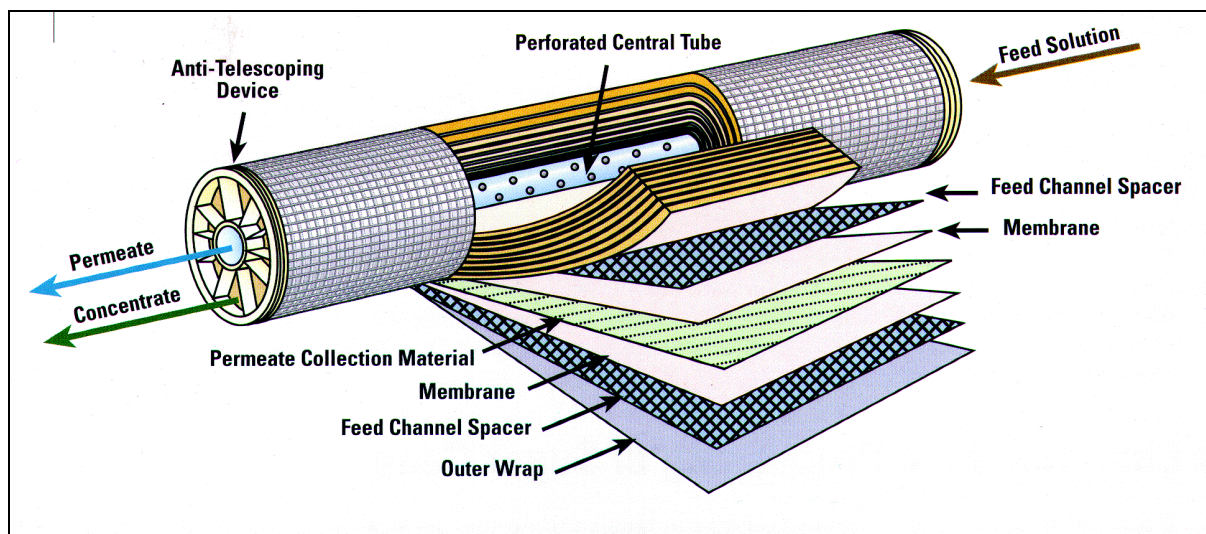
Da für die Konzentrationsversuche ausschließlich Spiralwickelmodule eingesetzt wurden, soll diese Modulbauform im folgenden kurz besprochen werden.

Beim Wickelmodul werden eine oder mehrere Membrantaschen zusammen mit je einem netzähnlichen Kunststoffgewebe (Retentatspacer) spiralförmig um ein Permeatsammelrohr gewickelt. Dabei bestehen die Membrantaschen aus zwei Membranen, zwischen denen ein

feines Kunststoffgewebe (Permeatspacer) liegt. Während die Taschen an drei Seiten geschlossen sind, ist die vierte Seite offen und wird an das perforierte Permeatrohr angeschlossen.

Die zu trennende Flüssigkeit tritt als sogenannter Feedstrom stirnseitig ein und strömt axial durch das Modul. Das Permeat fließt innerhalb der porösen Stützschrift spiralförmig dem Sammelrohr zu um von dort aus zentral abgeleitet zu werden.

**Abb. 5:** Schematischer Aufbau eines Wickelmoduls



Die feedseitigen Spacer dienen dabei nicht nur als Abstandhalter für die beiden Membranen, sondern haben außerdem die Aufgabe besonders bei geringen Überströmungsgeschwindigkeiten, durch Verwirbelung des Feedstrom der Konzentrationspolarisation entgegenzuwirken und damit den Stoffaustausch positiv zu beeinflussen.

Die wesentlichen Nachteile des Spiralwickelmoduls gegenüber anderen Modulbauarten liegen in der schlechten Reinigungsmöglichkeit, da diese Modulart in der Regel weder rückspülbar noch mechanisch zu Reinigen sind und in den zum Teil langen permeatseitigen Strömungswegen.

Vorteile sind die hohe Packungsdichte ( $< 1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) sowie die relativ einfache und kostengünstige Fertigung.