

### 3 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

#### 3.1 Das Prinzip der Umkehrosmose

Die Umkehrosmose hat in der Meer- und Brackwasseraufbereitung ihre Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit vielfach bewiesen. Seit der Einführung von Membranen findet die Umkehrosmose aber auch zunehmend Einsatz bei spezifischen Trennproblemen von wässrigen Lösungen in der Getränkeindustrie, da hier gegenüber alternativen Trennverfahren eine Hitzebelastung nicht oder kaum stattfindet. So wurde nach ersten Anwendungen in der Aufkonzentrierung von Fruchtsäften bereits in den 70er Jahren mit grundsätzlichen Untersuchungen in der Verarbeitung von Traubensäften begonnen. In der Regel werden Umkehrosmosefiltrationen analog zu der bekannten Crossflow-Mikrofiltration, als dynamische Prozesse (Querstromfiltration) angewandt, bei denen ein Feedstrom im Kreislauf über die Membranoberfläche geführt wird, während nur ein Teilstrom als Permeat die Membran passiert.

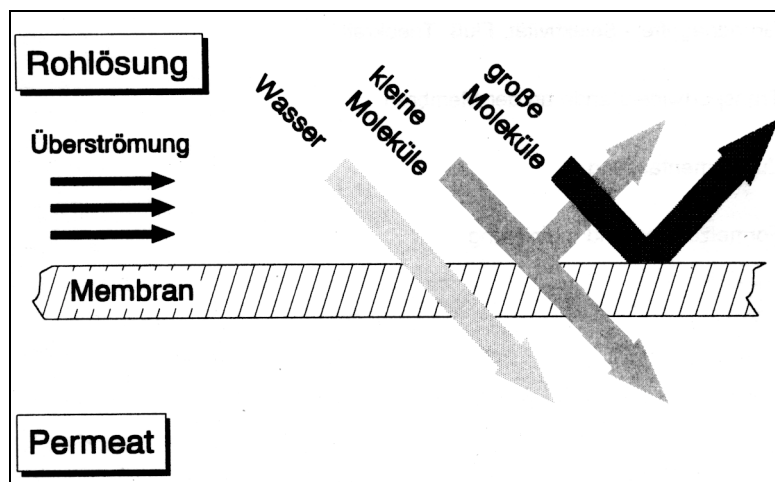
Um das Prinzip der Umkehrosmose zu erklären, ist es sinnvoll zunächst den Begriff der Osmose zu betrachten. Unter Osmose versteht man das Zustandekommen eines Konzentrationsgleichgewichtes zwischen zwei in einem Behältnis befindlichen Flüssigkeiten, die durch eine semipermeable Membran getrennt sind. Dabei erfolgt der Konzentrationsausgleich durch die einseitige Diffusion des Lösungsmittels der schwächer konzentrierten Flüssigkeit zu der Seite der stärker konzentrierten Flüssigkeit. Die treibende Kraft ist hierbei die osmotische Druckdifferenz ( $\Delta\pi$ ) zwischen den Flüssigkeiten, die direkt von der Molzahl der gelösten Stoffe abhängig ist. Je größer also der Konzentrationsunterschied zwischen den beiden Flüssigkeiten, desto größer ist die osmotische Druckdifferenz, mit der das Lösungsmittel zur Diffusion durch die Membran gezwungen wird. Dabei entsteht jedoch durch den Fluß des Lösungsmittels auch eine hydrostatische Druckdifferenz zwischen den beiden Flüssigkeiten ( $\Delta p$ ). Die Diffusion endet dann, wenn die osmotische Druckdifferenz der hydrostatischen Druckdifferenz der gegenüberliegenden Seite gleich ist und es stellt sich ein sogenanntes osmotisches Gleichgewicht ein ( $\Delta p = \Delta\pi$ ).

Übersteigt die transmembran angelegte Druckdifferenz die Differenz der osmotischen Drücke ( $\Delta p > \Delta\pi$ ), so erfolgt eine der Osmose entgegengesetzte Diffusion des Lösungsmittels und es kommt zur weiteren Aufkonzentrierung. Dieser Prozeß wird als Umkehrosmose bezeichnet.

Bei der Umkehrosmose ist demnach die treibende Kraft für den Transport einer wässrigen Komponente primär die Nettodruckdifferenz ( $\Delta p - \Delta\pi$ ), die zwischen den beiden Seiten einer Membran vorherrscht.

Im weitesten Sinne ist auch die Umkehrosmosemembran ein Filter, und es erfolgt wie bei der normalen Filtration eine Trennung dadurch, daß mindestens eine Komponente des zu trennenden Gemisches die Membran passieren kann, während andere Komponenten mehr oder weniger stark zurückgehalten werden (Abb. 1).

**Abb. 1:** Schematische Darstellung des Trennverhaltens von Membranverfahren (RAUTENBACH 1996)



Im Gegensatz zu herkömmlichen Filtern erlauben Membranverfahren wie die Umkehrosmose, eine Trennung bis in den molekularen Bereich und stehen damit auch in der Aufkonzentrierung von Säften in Konkurrenz zu klassischen Verfahren wie beispielsweise der Destillation und der Adsorption (RAUTENBACH 1996).

### 3.2 Grundlagen zum Membrantrennprozeß

Kern aller Membranverfahren ist natürlich die Membran selbst, mit den örtlich an und in ihr stattfindenden Transportvorgängen. Von zentraler Bedeutung sind hierbei die Selektivität, d.h. die Fähigkeit zwischen zwei Komponenten eines Gemisches zu unterscheiden und die Leistungsfähigkeit der Membran, d.h. der Permeatfluß unter bestimmten Betriebsbedingungen.

Die Selektivität ist ein Maß für die Trennschärfe von Membranen und wird bei der Umkehrosmose häufig durch das Rückhaltevermögen für bestimmte Komponenten oder der sogenannten Rückhalterate der Dimension (%) ausgedrückt. Der Fluß, auch Flux genannt, ist der auf die Fläche bezogene Stofftransport durch die Membran und hat daher die Dimension

Masse/Fläche \* Zeit. Der Gesamtfluß ist hierbei ein Mittelwert aus den Partialflüssen entlang der Membran.

Fluß und Selektivität werden durch den Stofftransport in der Membran (Membrantrenncharakteristik) bestimmt. In der Literatur werden diverse Ansätze zur halbempirischen Modellierung des Stofftransportes in Membranen diskutiert. Einen guten Überblick über derartiger Transportmodelle geben die Ausführungen von MASON u. LONSDALE (1993), MEARES (1976) UND MERTEN (1966), auf die an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen werden soll.

Im wesentlichen werden zwei unterschiedliche Mechanismen, die für den Stofftransport bzw. die Permeation verantwortlich sind unterschieden. Der im einfachsten Fall, rein konvektive Transport durch die Poren und der Transport aufgrund von Diffusion, wobei hier die transportierte Komponente in der Membranphase gelöst sein muß.

Vereinfacht werden Membranen daher entweder als reine Porenmembranen oder als reine Lösungs-Diffusions-Membranen betrachtet. In realen Membranen finden diese beiden Transportmechanismen jedoch häufig nebeneinander statt.

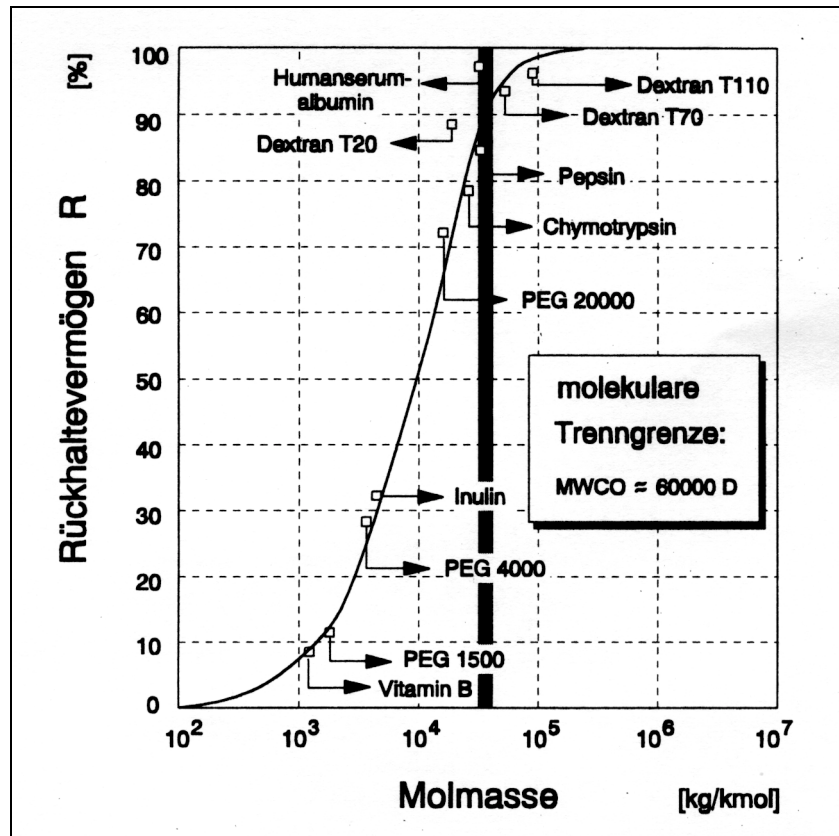
Die Prozesse der Umkehrosmose (RO = revers osmosis) beruhen auf dem Einsatz von Lösungs-Diffusions-Membranen (RAUTENBACH 1996).

Im folgenden werden beide Grundmodelle des Stofftransportes in Membranen kurz beschrieben.

### **3.2.1 Porenmodell**

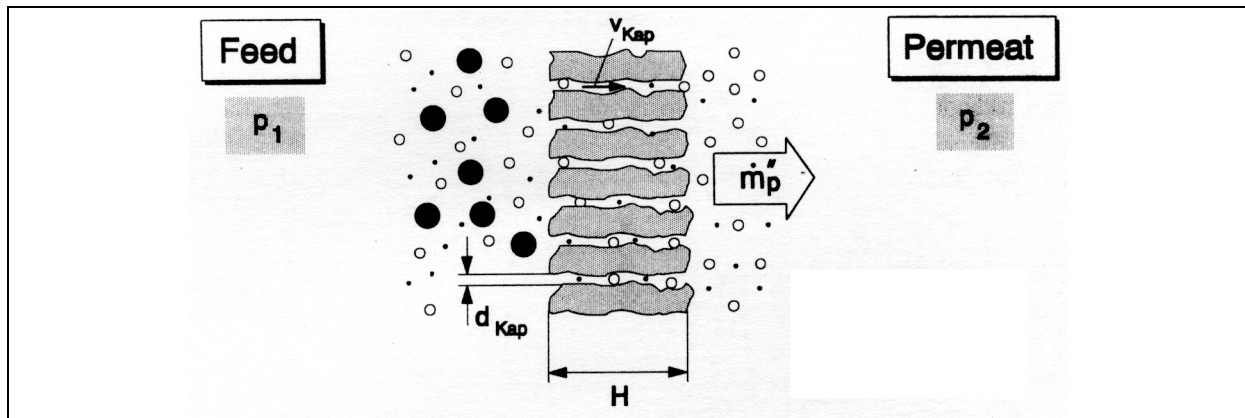
Bei dem Porenmodell geht man davon aus, daß der Fluß des Lösungsmittel durch die Membran mit Hilfe der aus der Filtrationstheorie bekannten Carman-Konzezy-Beziehung zu beschreiben ist. Sind die Porengrößen einer Membran und die Größe (Molmasse) der abzutrennenden Substanzen von gleicher Größenordnung, so werden aufgrund der stets vorhandenen Streuung in der Porenverteilung die Substanzen teils zurückgehalten, teils werden sie durch die Membran permeieren. Die Abscheidung erfolgt hier also lediglich aufgrund der Siebwirkung einer porösen Membran. Daher ist die Selektivität der Porenmembran durch die experimentell zu bestimmende Fraktionsabscheidekurve zu charakterisieren (Abb. 2).

**Abb. 2:** Trennkurve einer Porenmembran Trenngrenze ca. 600.000 Dalton (RAUTENBACH 1996)



Die Kurve steht im Zusammenhang mit der Porengrößenverteilung der Membran und zeigt mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Teilchen bestimmter Molmasse von der Membran zurückgehalten wird.

Unter der Annahme, daß die Strömung durch poröse Membranen einer Strömung durch Haufwerke entspricht und die Membran selbst ein System parallel geschalteter Kapillaren ist, ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Permeatfluß und Druckdifferenz als treibende Kraft (Abb. 3).

**Abb. 3:** Modell einer Porenmembran (RAUTENBACH 1996)

Dieser lineare Zusammenhang, der sich in der Praxis immer wieder bestätigt, läßt sich nach der Formel

$$V_p = \frac{m''_p}{\rho_p} = A \Delta p$$

Zeichen	Dimension	Bedeutung
$V_p$	$\text{l/m}^2 \text{ s}$	Permeatfluß
$m''_p$	$\text{kg/m}^2 \text{ s}$	flächenspez. Massenstrom
$\rho_p$	$\text{kg/m}^3$	Dichte des Permeats
$A$	$\text{kg/m}^2 \text{ s bar}$	Membrankonstante
$\Delta p$	bar	Druckdifferenz

ermitteln.

Die Ermittlung der Membrankonstante ( $A$ ) erfolgt dabei durch einen Permeationsversuch mit reinem Wasser. In der Praxis werden bei der Querstromfiltration jedoch meist Medien filtriert, die aufgrund ihrer Inhaltsstoffe zur Deckschichtbildung neigen. D.h. die von der Membran zurückgehaltenen Stoffe bilden einen Belag (Sekundärschicht), der sowohl den Filtratfluß als auch die Trenncharakteristik weit mehr beeinflusst als die Membran selbst (RAUTENBACH 1996).