

Institut für Physikalische Chemie

Technische Universität Braunschweig

Fakultät für Lebenswissenschaften

Hans-Sommer-Str. 10 • 38106 Braunschweig



Hausarbeit zur Vorlesung PC V (SS 2006):

Physikalische Chemie der Grenzflächen

„Membranen und Osmose“

Verfasser:

Björn Wiegmann, Matr.-Nr.: 2748207, e-mail: skyleif@web.de

Henry Gerfelmeyer, Matr.-Nr.: 2720128, e-mail: henryarcor@arcor.de

Seminarleiter:

Dr. R. Tuckermann, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB),
Fachbereich 6.12 (Umweltradioaktivität), Tel.: 0531-5926107

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Membranen.....	3
2.1 Biologische Membranen	3
2.1.1 Membranstruktur und Membranaufbau	4
2.1.2 Transport durch Membranen	6
2.2 Permeabilität von Membranen.....	8
2.3 Membranverfahren.....	9
2.3.1 Carriermoleküle	10
2.3.2 Immobilisierte Flüssigmembranen	10
2.3.3 Polymermembranen.....	11
3. Osmose	13
3.1 Theorie zur Osmose	13
3.2 Osmose in der Natur	16
3.2.1 Plasmolyse.....	17
3.2.2 Osmotische Zustandsgleichung.....	18
3.2.3 Das Donnan-Gleichgewicht	19
3.3 Technische Anwendungen der Osmose.....	20
3.3.1 Dialyse.....	20
3.3.2 Umkehrosmose	21
3.3.3 Das Osmosekraftwerk	21
4. Fazit	23
5. Literaturverzeichnis.....	24
6. Anhang	26
6.1 Demonstrationsversuche zu Membranen und Osmose.....	26
6.1.1 Phenolphthalein-Versuch	26
6.1.2 Versuch zu Biomembranen	27

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit behandelt im ersten Teil als Schwerpunkt Membranen. Dabei wird zunächst auf biologische Membranen und deren Aufbau und Struktur eingegangen. Des Weiteren werden Transportprozesse und verschiedene Permeabilitäten sowie abschließend unterschiedliche Anwendungen der Membranverfahren mit immobilisierten Flüssigmembranen und synthetischen Polymermembranen erläutert.

Im zweiten Teil wird als Schwerpunkt Osmose behandelt. Als erstes wird die zugrunde liegende Theorie behandelt, wobei im Anschluss Osmoseprozesse in der Natur erläutert werden. Zuletzt werden technische Anwendungen, die auf den Prinzipien der Osmose beruhen, vorgestellt.

2. Membranen

Membranen können in biologische und synthetische Membranen unterteilt werden. Sie dienen zum einen der Trennung und Anreicherung von Stoffen und zum anderen einem selektiven Stofftransport. Die biologische Zellmembran war die Voraussetzung für die Entstehung des Lebens auf der Erde und dient heutzutage als Vorbild für die chemische Verfahrenstechnik bei der Herstellung von dünnen, synthetischen Membranen mit entsprechender Selektivität und Funktionalität. Mit Hilfe dieser synthetischen Membranen und das Wissen über den Stofftransport durch flüssige Membranen haben sich etliche Membranverfahren entwickelt und in der Industrie etabliert.

2.1 Biologische Membranen

Biologische Membranen bestehen aus Proteinen und Lipiden, welche eine flüssige Lipiddoppelschicht mit integrierten Membranproteinen bilden, die über hydrophobe Wechselwirkungen zusammengehalten wird. Die Zell- oder Plasmamembran trennt dabei jeweils zwei wässrige Kompartimente voneinander ab, um z.B. die Organellen der eukaryotischen Zelle abzugrenzen und biologische Prozesse zu ermöglichen. Dabei katalysieren die Membranproteine eine Reihe chemischer Reaktionen, vermitteln den Fluss von Nährstoffen und Abbauprodukten und sind an der Weitergabe von Informationen aus der extrazellulären Umgebung an verschiedene intrazelluläre Bestandteile beteiligt.

2.1.1 Membranstruktur und Membranaufbau

Die Lipide bilden das Grundgerüst einer Membran und haben amphipathische Eigenschaften, d.h. sie bestehen aus einem hydrophoben, nichtpolaren sowie aus einem hydrophilen, polaren Ende. Somit können sie spontan Mizellen, Einzel- oder Doppelschichten (engl.: Monolayer und Bilayer) bilden. Die Ausbildung der jeweiligen Strukturen wird durch den hydrophoben Effekt hervorgerufen, indem die unpolaren Substanzen den geringstmöglichen Kontakt zu Wasser eingehen. Mizellen sind einschichtige, runde Molekülaggregate, bei denen der hydrophile Kopf das Wasser nach außen abgrenzt und das hydrophobe Ende nach innen gerichtet ist. In Abbildung 1 ist das Schema der Mizellenbildung im Dispersionsmedium Wasser dargestellt. Bei Kontakt mit der Luft richten sich die Lipide als Monolayer aus, wobei die hydrophoben Enden nach außen gerichtet sind.

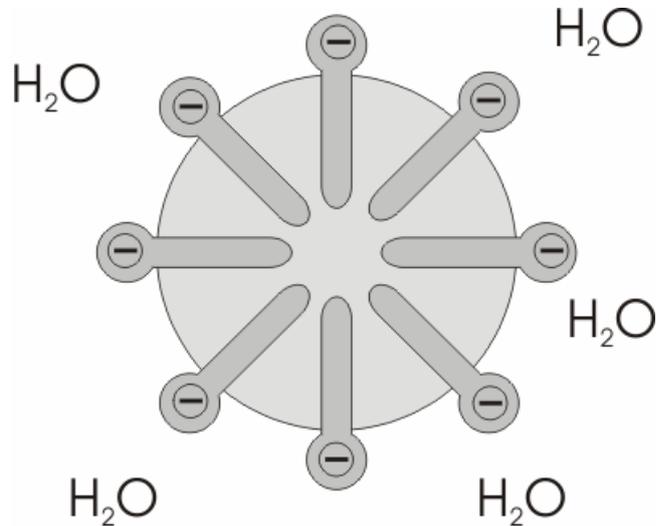


Abb.1: Mizelle in Wasserlösung^[22]

Biologische Membranen sind als kontinuierliche Doppelschicht angeordnet, der so genannten Lipiddoppelschicht (engl.: lipid-bilayer), wie sie in Abbildung 2 gezeigt ist. Die am häufigsten

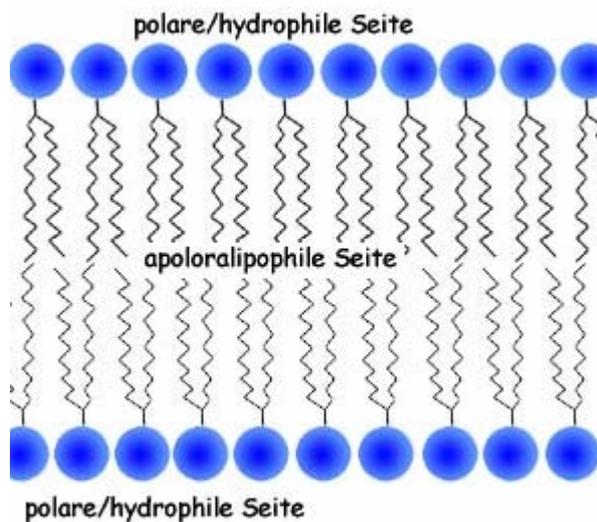


Abb.2: Aufbau der Lipiddoppelschicht^[23]

vorkommenden Membranlipide sind die Phospholipide. Durch ihre zylindrische van-der-Waals-Hülle bewirken sie den Aufbau dieser Doppelschicht und können dadurch auch Liposomen bilden. Hierbei handelt es sich um geschlossene, sich selbst abschließende, lösungsmittelgefüllte Vesikel sind, die nur durch eine einzelne Doppelschicht begrenzt werden. Diese Liposomen können künstlich hergestellt werden und dienen daher als Modell für das Verhalten von Membranen. Sie haben gewöhnlich einen Durchmesser von einigen zehn

Nanometern, wohingegen die einfache Lipiddoppelschicht nur etwa 6 - 8 nm dick ist.

Die Lipiddoppelschicht ist undurchlässig für polare und geladene Moleküle und ermöglicht somit, dass sich die Konzentrationen der gelösten Substanzen auf beiden Seiten der Membran erheblich unterscheiden können. Dadurch kann in einem Kompartiment, das durch eine Doppelschicht abgegrenzt ist, eine Zusammensetzung von großen und kleinen Molekülen aufrechterhalten werden, die benötigt wird, um einen bestimmten Stoffwechselfvorgang auszuführen. Dennoch müssen aufgrund von sich ändernden äußeren Einflüssen und dem Fließgleichgewicht von Energie und Stoffen bestimmte Moleküle und Ionen die Lipiddoppelschicht passieren können. Dafür sind die in die Membran eingebetteten Membranproteine zuständig. In Abbildung 3 ist das Flüssig-Mosaik-Modell (engl.: fluid mosaic model) dargestellt, welches als Modell für die Anordnung und Organisation der Membranstruktur 1972 von S. Jonathan Singer und Garth Nicolson vorgeschlagen wurde.

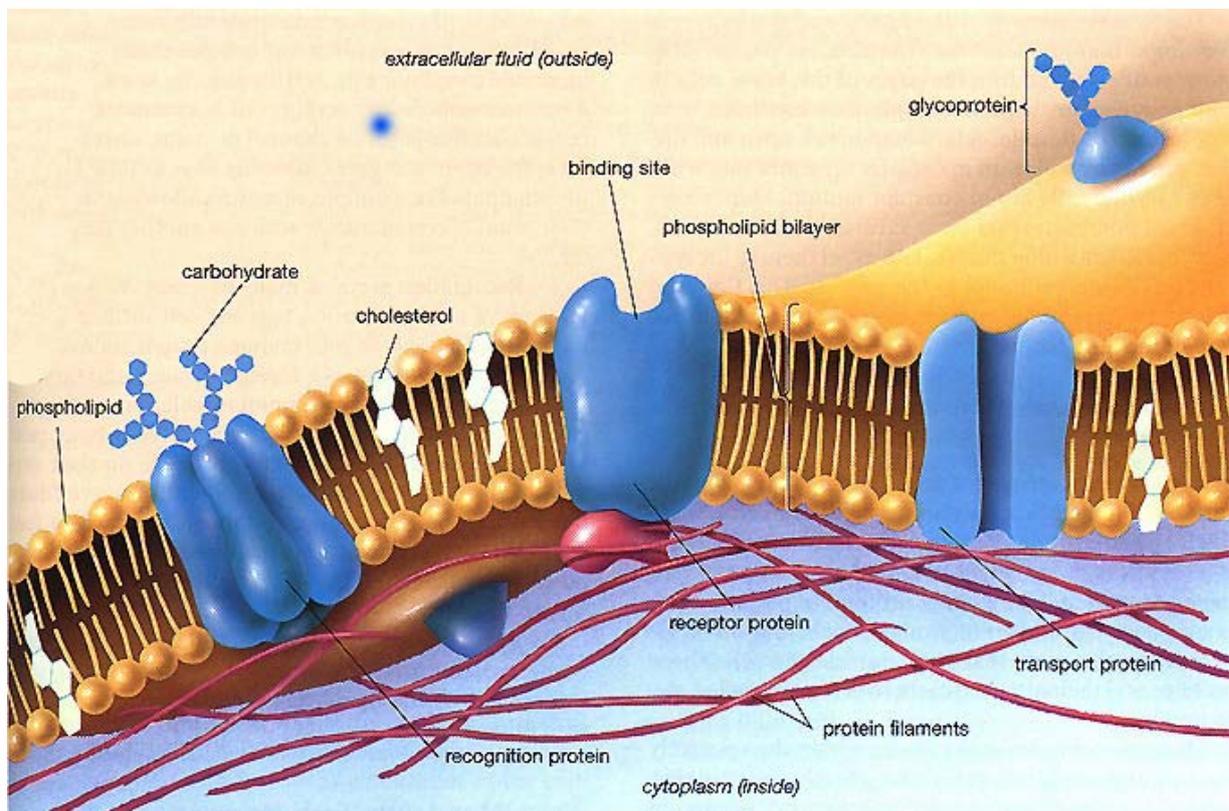


Abb.3: Schematische Darstellung der Plasmamembran (Flüssig-Mosaik-Modell)^[24]

In diesem Flüssig-Mosaik-Modell sind die integralen Membranproteine sichtbar, die aus der zweidimensionalen Lipidschicht hervorragen. Diese integralen Proteine können lateral in der Lipidschicht diffundieren, sofern ihre Bewegung nicht durch Assoziation mit anderen Zellbestandteilen beeinträchtigt wird.

2.1.2 Transport durch Membranen

Wie bereits erwähnt können für den Stofftransport durch Membranen spezifische Transportproteine notwendig sein. Diese Proteine vermitteln alle transmembranen Bewegungen von kleinen anorganischen Ionen bis hin zu größeren Stoffwechselverbindungen wie Zucker und Aminosäuren. Der Transport durch Membranen wird in Abhängigkeit von der Thermodynamik des Systems in passiven und aktiven Transport unterteilt:

a) Passiver Transport

Beim passiven Transport spricht man von freier Diffusion eines Substrats durch die Membran entlang eines Konzentrationsgradienten (Transport eines Stoffes vom Ort hoher Konzentration zum Ort niedriger Konzentration), welcher ohne Energieverbrauch abläuft. Das ist der Fall, wenn die freie Enthalpie $\Delta G < 0$ ist (spontaner Fluss). Somit gilt für den Transport eines Substrats z.B. aus einem extrazellulären Raum in das Cytoplasma folgende Beziehung:

$$\Delta \bar{G} = RT \ln \left(\frac{c(\text{innen})}{c(\text{außen})} \right) < 0 \quad (1)$$

mit: \bar{G} = chemisches Potential, R = allg. Gaskonstante, T = Temperatur [K], c = Konzentration [mol/l]

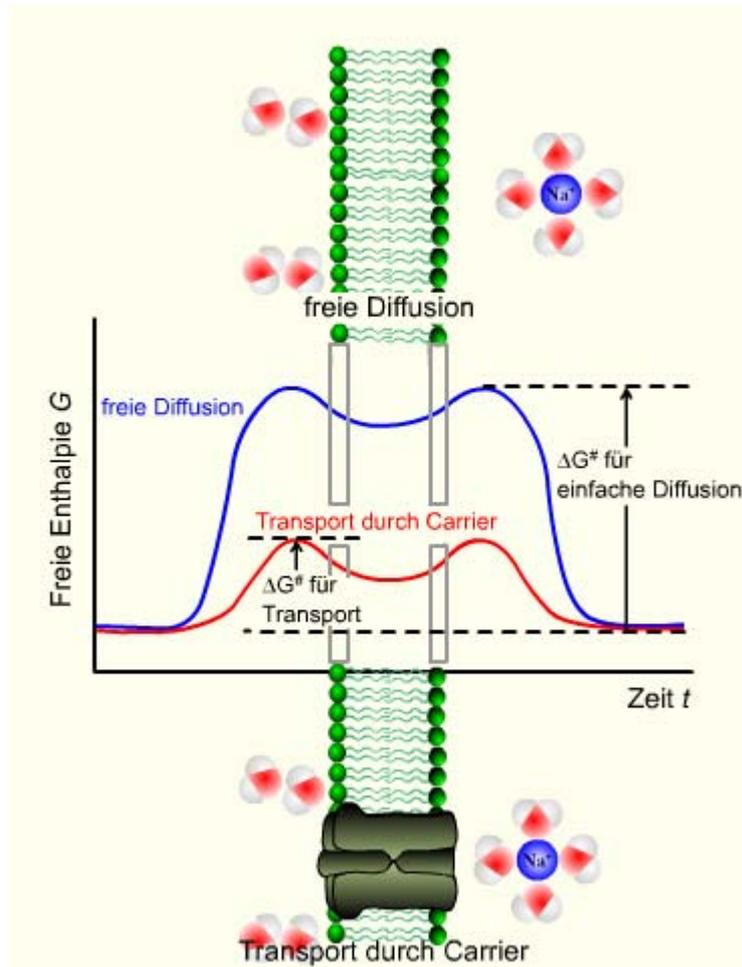
Durch das Konzentrationsgefälle einer Substanz zwischen zwei Seiten einer Membran entsteht so eine chemische Potentialdifferenz. Gl.1 gilt dabei jedoch nur für unpolare Moleküle. Beim Transport eines Ions durch eine Membran muss diese Gleichung erweitert werden, da dies zu unterschiedlichen Ladungsverhältnissen auf beiden Seiten der Membran führt. Um die elektrische Arbeit einzuführen, die geleistet werden muss, um den Stoff von außen nach innen durch die Membran zu transportieren, wird folgende Gleichung (Gl.2) erhalten:

$$\Delta \bar{G} = RT \ln \left(\frac{c(\text{innen})}{c(\text{außen})} \right) + ZF\Delta\Phi < 0 \quad (2)$$

mit: \bar{G} = hier: elektrochemisches Potential, Z = ionische Ladung, F = Faraday-Konstante, $\Delta\Phi$ = elektrische Potentialdifferenz

Die elektrische Potentialdifferenz bezeichnet man als Membranpotential, welche bei lebenden Zellen gewöhnlich bei -100 mV liegen. Auch hier muss $\Delta \bar{G} < 0$ sein, damit ein passiver Transport möglich ist.

Beim Vorgang dieser freien Diffusion muss zum Abstreifen der Hydrathülle des Substrats eine Aktivierungsenergie aufgewendet werden. Aufgrund der Ionen-Dipol-Wechselwirkungen ist diese Aktivierungsenergie bei Ionen besonders hoch. Unpolare Moleküle, wie Steroide und Sauerstoff, diffundieren dagegen sehr leicht mittels freier Diffusion.



Die Diffusion kann durch Carrier (Träger) und Kanäle (Transportproteine) jedoch erleichtert werden, die den Transport von polaren Stoffen oder Ionen vermitteln. In Abbildung 4 ist der Vergleich zwischen freier und vermittelter Diffusion dargestellt. Beim Transport mittels Carrier wird das Substrat mit vielen nicht-kovalenten Wechselwirkungen gebunden und dadurch die Energielücke kompensiert. Dies hat zur Folge, dass die Aktivierungsenergie geringer und der Transport somit energetisch günstiger wird.

Abb.4: Thermodynamische Veränderungen während des Durchgangs eines Natrium-Ions durch die Membran^[21]

b) Aktiver Transport

Beim aktiven Transport wird ein Stoff gegen das Konzentrationsgefälle vom Ort niedriger zum Ort hoher Konzentration transportiert. Dabei ist $\Delta\bar{G} > 0$, d.h. ein Transport ist nur unter Energieaufwand möglich. Somit muss dieser endergonische Vorgang mit einem hinreichenden exergonischen Vorgang gekoppelt sein, damit $\Delta\bar{G} < 0$ wird. Diese Art des aktiven Transports muss über Carrier, Permeasen oder Kanäle vermittelt werden.

Dabei kann die Energie einmal direkt über einen primären aktiven Transport durch Hydrolyse energiereicher Verbindungen wie ATP (Adenosintriphosphat), Redoxreaktionen oder über Lichtabsorption aufgewendet werden. Beim sekundären Transport stammt die Energie für den Transport der Substanz aus einem elektrochemischen Konzentrationsgradienten.

2.2 Permeabilität von Membranen

Im Allgemeinen unterscheidet man unterschiedliche Permeabilitäten aufgrund verschiedener Eigenschaften der Membranen. Zunächst lässt sich die Permeabilität einer Membran durch den Permeabilitätskoeffizienten P charakterisieren:

$$P = \frac{D}{d} \quad (3)$$

mit: P = Permeabilitätskoeffizient [m/s], D = Diffusionskoeffizient [m²/s], d = Schichtdicke [m]

Der Permeabilitätskoeffizient ist somit proportional zum Diffusionskoeffizienten und umgekehrt proportional zur Schichtdicke d . Um dem Zweiphasensystem einer Membran (hydrophile und lipophile Phase) gerecht zu werden, muss Gl.3 noch um den Verteilungskoeffizienten k erweitert werden:

$$P = \frac{kD}{d} \quad (4)$$

Der Verteilungskoeffizient ist dimensionslos und ist ein Maß für die Lipophilie eines Stoffes. Er beschreibt das Verhältnis der Stoffkonzentration zwischen Membran und wässriger Phase. Dass der Verteilungskoeffizient keine Dimension besitzt, wird durch das Nernstsche Verteilungsgesetz deutlich, indem es das Verhältnis zweier Stoffkonzentrationen gegenüberstellt:

$$k = \frac{c_1}{c_2} \quad (5)$$

mit: c_1 = Stoffkonzentration in der Membran [mol/l] und c_2 = Stoffkonzentration in der hydrophilen Phase [mol/l]

Aufgrund der unterschiedlichen Permeabilität unterscheidet man zwischen verschiedenen Arten von Membranen:

- Völlig undurchlässige Membranen → impermeabel
- Teilweise durchlässige Membranen → semipermeabel
- Membranen, die nur in eine Richtung durchlässig sind
- Völlig durchlässige Membranen → omni-permeabel

Die semipermeablen Membranen spielen dabei die bedeutendste Rolle, z.B. bei der Osmose, Zellfunktionen und technischen Prozessen.

2.3 Membranverfahren

Nach dem Vorbild der biologischen Membranen mit ihren diversen Funktionen, wie Schleusen, Schranken, Pumpen und der spezifischen Permeabilität wurden unterschiedliche Membranverfahren entwickelt. Ein großer Vorteil der Membranverfahren zur Trennung von Stoffen sind dabei die milden Bedingungen, d.h. die zu trennenden Stoffe werden thermisch nicht belastet und es ist ein vergleichsweise einfaches Verfahren mit geringem Energiebedarf. Außerdem ist die Größe der Membranmodule eher klein im Vergleich mit anderen Bauteilen in der chemischen Verfahrenstechnik. Ein Nachteil dieser Verfahren liegt darin, dass die Permeation von Stoffen durch die Membran nur langsam verläuft. Durch Verwendung dünner Membranen und großer Membranflächen kann dieser Nachteil jedoch reduziert werden. Im Gegensatz zu festen Polymermembranen ist der Wert des Diffusionskoeffizienten D eines Stoffes in einem Fluid weitaus höher (Fluid: $D = 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$; Polymer: $D = 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$). Wegen der höheren Teilchenflußdichten durch flüssige Membranen und der Möglichkeit die Transportrate und die Selektivität des Transports durch Carrier in diesen Membranen zu erhöhen, sind zur Anreicherung und Trennung von Stoffen eher die flüssigen Membranen als die nicht-porösen Polymermembranen von Interesse. Poröse und nicht poröse synthetische Polymermembranen haben z.B. zahlreiche Anwendungen in der Heterogenen Katalyse, industriellen Synthesegastrennung, Ultrafiltration und in Membranreaktoren.

2.3.1 Carriermoleküle

Der Vorteil bei flüssigen Membranen ist, wie bereits erwähnt, das Ausnutzen der Transportphänomene durch den Einsatz von Carriermolekülen. Durch das Einsetzen von Carriermolekülen wird die Selektivität für den Stofftransport durch eine flüssige Membran erheblich erhöht. Abbildung 5 zeigt Vertreter natürlich vorkommender und synthetischer Komplexmoleküle. Dabei wurden ausgehend von einem natürlichen komplexen Carriermolekül entsprechende Kronenether-Liganden und bicyclische Cryptanden entwickelt, die diese Carrierfunktion ebenso ausüben. Durch diese synthetischen Carrier können z.B. selektiv Ionen durch die Membranen transportiert werden, wobei in biologischen Systemen der selektive Ionentransport durch Ionenkanäle erfolgt. Die Entwicklung von synthetischen Ionenkanälen in der chemischen Verfahrenstechnik befindet sich aber noch in den Anfängen.

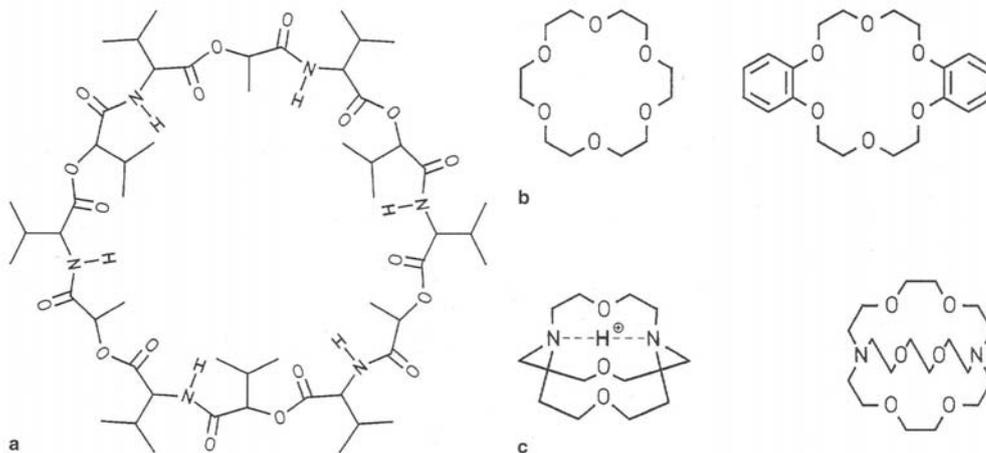


Abb.5: Strukturen von natürlich vorkommenden und synthetischen Carriermolekülen
a Valinomycin (natürlich), *b* Kronenether-Liganden (synthetisch), *c* bicyclische
Kryptanden (synthetisch)^[8]

2.3.2 Immobilisierte Flüssigmembranen

Bei immobilisierten Flüssigmembranen unterscheidet man zwischen Wassermembranen oder Ölmembranen. Flüssigmembranen werden allgemein zwischen einer porösen Matrix immobilisiert. Die Wassermembran wird eingesetzt, wenn ein Gastransport durch eine immobilisierte Flüssigmembran untersucht werden soll und besteht demzufolge aus einer wässrigen Phase. Bei der Ölmembran hingegen soll ein Stofftransport aus einer wässrigen Phase untersucht werden und demnach besteht hier die immobilisierte Flüssigmembran aus einer Ölphase.

Abbildung 6 zeigt diese beiden unterschiedlichen Immobilisierungen, wobei in der Flüssigmembran jeweils der Carrier gelöst vorliegt.

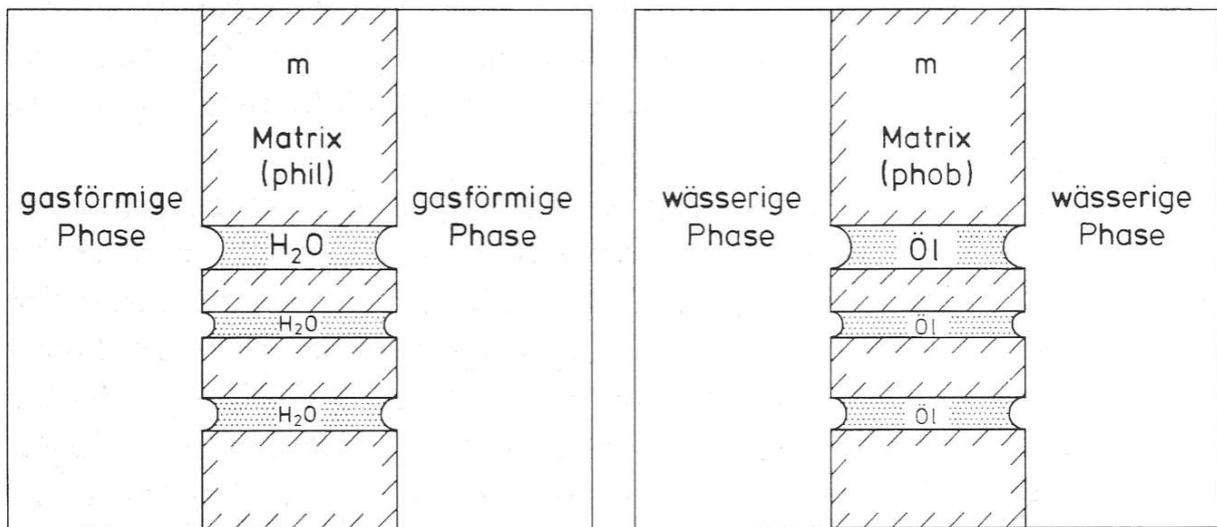


Abb.6: Schematische Darstellung immobilisierter Flüssigmembranen
Abkürzungen: phil = hydrophil, phob = hydrophob^[8]

Bei der praktischen Anwendung von immobilisierten Flüssigmembranen bestehen jedoch Schwierigkeiten, die auf die Langzeitstabilität zurückzuführen sind. Daher gibt es bisher noch keine großtechnischen Anwendungen dieses Membrantyps.

2.3.3 Polymermembranen

Polymermembranen können hinsichtlich des Membranmaterials, der Morphologie, Geometrie, Anwendung und der Transportmechanismen für den jeweiligen Einsatzort synthetisch angepasst werden. Bei porösen Membranen kann man beispielsweise die Porengröße (Mikro-, Meso- oder Makroporen) und somit die Selektivität verändern. Diese Art von Stofftrennung wird Siebmechanismus genannt, wobei die Selektivität im Wesentlichen auf der Differenz zwischen Teilchen- und Porengröße beruht. Durch Variation der Porengröße durch mehrere Membranlagen erhält man Kompositmembranen. Bei den porenfreien Polymermembranen erfolgt der Stofftransport allein durch Diffusion, wobei die Selektivität durch Unterschiede der Adsorption und Diffusionsgeschwindigkeit der permeierenden Stoffe in der Polymermatrix bestimmt wird. Diese porösen oder porenfreien Polymermembranen werden z.B. bei der Gaspermeation, der Trennung von Gas- und Dampfgemischen, oder der Pervaporation, der Trennung von flüssigen Gemischen, eingesetzt.

Durch Kombination mit Katalysatoren erhält man katalytisch, aktive Polymermembranen. Diese können beispielsweise zur katalytischen Hydrierung von Propen zu Propan (schnelle und starke exotherme Reaktion) eingesetzt werden.

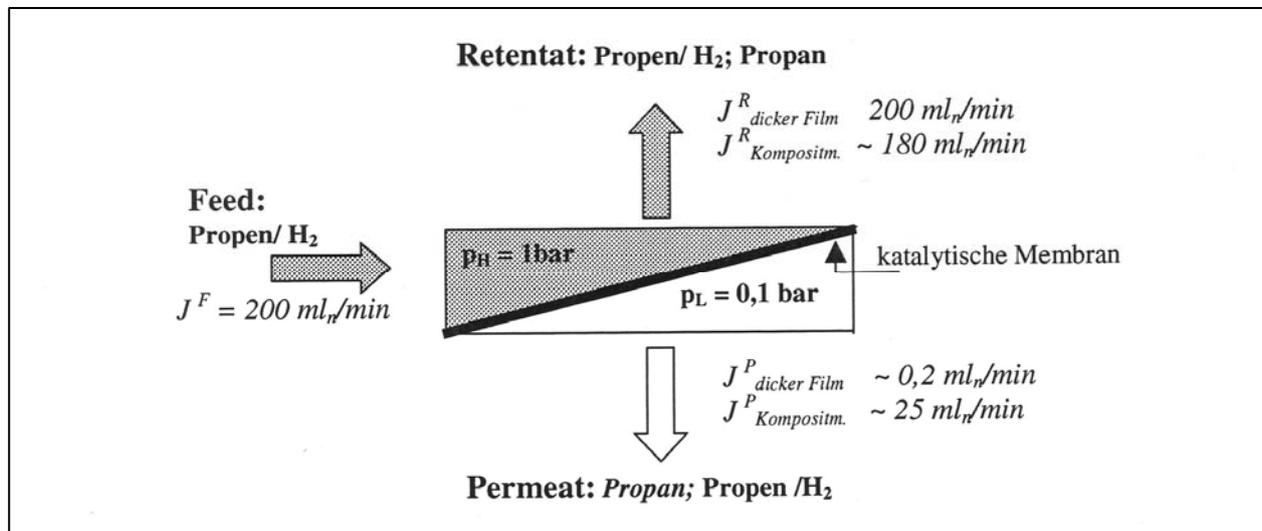


Abb.7: Schematische Darstellung der Reaktionsführung im Membranreaktor bei Einsatz von porenfreien, katalytischen Polymermembranen zur Hydrierung von Propen^[14]

Diese Reaktion ist zwar nicht von technischem Interesse, kann jedoch für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Membranen sehr hilfreich sein. Abbildung 7 zeigt diese Art der Reaktionsführung in einem Membranreaktor, wobei zum einen ein dicker Membranfilm und zum anderen eine Kompositmembran verwendet wurden. Bei der Kompositmembran erhält man schneller das gewünschte Permeat, weil der Stofffluss J dort erheblich höher ist. Somit ist der Einsatz einer entsprechenden Kompositmembran wesentlich effizienter hinsichtlich der Permeabilität.

Andere Einsatzmöglichkeiten von Polymermembranen finden sich bei der Synthesegasgewinnung von Wasserstoff und Kohlenmonoxid. Bei der Gewinnung von Kohlenmonoxid wird beim Trennprozess durch eine semipermeable Membran eine CO-Anreicherung in einem Gasgemisch erzielt. Bei der H₂-Isolierung wird nach einem neu entwickelten Verfahren von Monsanto ebenfalls eine semipermeable Membran eingesetzt. Das Gasgemisch umströmt ein Hohlfaserbündel, das mit seinen beschichteten semipermeablen Polysulfonwänden nur Wasserstoff oder Helium in die Hohlfasern diffundieren lässt. Dabei werden Begleitgase wie CH₄, CO, O₂ und N₂ abgetrennt. Weltweit werden diese H₂-Trennanlagen von Monsanto großtechnisch zur Einstellung des H₂/CO-Verhältnisses für die Oxo-Synthese und für die H₂-Rückgewinnung aus Abgasen von Hydrier- und NH₃-Anlagen eingesetzt.

3. Osmose

3.1 Theorie zur Osmose

Beobachtet man ein U-Rohr, das an der tiefsten Stelle durch eine nur für H_2O -Moleküle durchlässige Membran getrennt ist und füllt die beiden Hälften mit NaCl-Lösung unterschiedlicher Konzentration, beobachtet man, dass in der Hälfte mit höherer Konzentration der Pegel steigt, während er in der anderen Hälfte fällt.

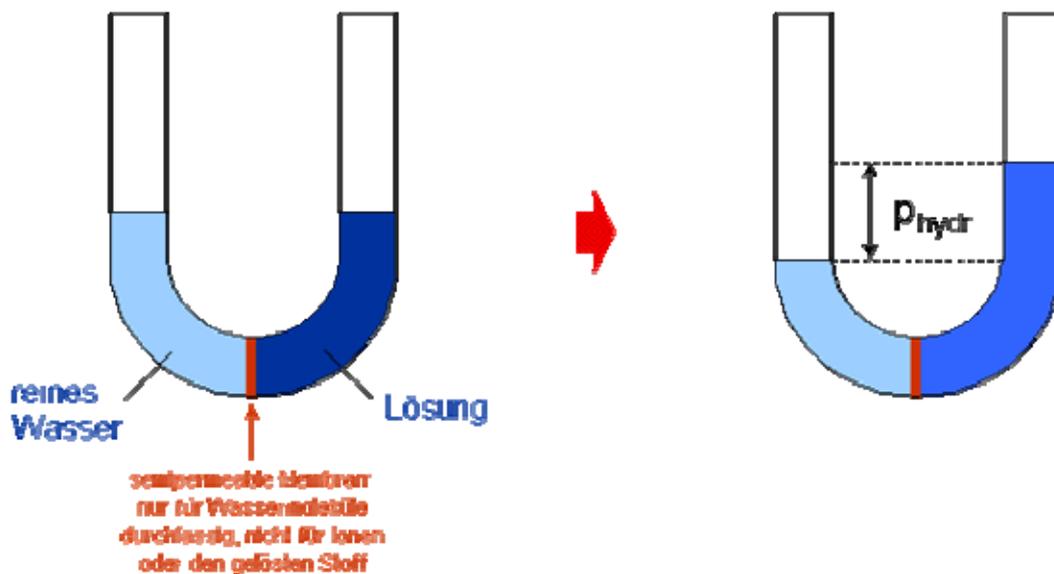


Abb.8: Schematische Darstellung der Osmose^[20]

Dieses Phänomen wird Osmose genannt und ist in Abb.8 schematisch dargestellt. Osmose beruht auf dem Konzentrationsgefälle zwischen den beiden Lösungen, da die Lösungsmittelmoleküle von der Lösung mit niedriger Konzentration zur Lösung mit höherer Konzentration wandern, um den Unterschied möglichst auszugleichen. Die Triebkraft für die Reaktion ist die Zunahme der Entropie.

Wichtig ist, dass es sich hierbei um ein rein physikalisches Phänomen handelt, das nicht von den chemischen oder physikalischen Eigenschaften der gelösten Ionen oder Moleküle abhängt, sondern einzig von ihrer Anzahl, d.h. ein Gramm Polysaccharide, bestehend aus jeweils 1000 Glucoseeinheiten, hat denselben osmotischen Effekt, wie ein Milligramm Glucose. Solche Teilchen nennt man kolligativ. Um dies zu quantifizieren wird der Begriff der Osmolarität eingeführt. Diese ist definiert als die Anzahl der kolligativen Teilchen pro Liter [mol/L].

Werden zwei Lösungen miteinander verglichen, gibt es drei Möglichkeiten:

1. Die Osmolarität in beiden ist gleich
2. Die Osmolarität in beiden ist unterschiedlich
3. In einer Lösung sind gar keine kolligativen Teilchen enthalten

Lösungen der ersten Art werden isotonisch genannt, da der Austausch von Lösungsmittelmolekülen durch die Membran im Gleichgewicht ist. Somit ist keine Veränderung messbar, da gleich viele Teilchen in beide Richtungen durch die Membran fließen.

Bei Lösungen mit unterschiedlichen Osmolaritäten wird die Lösung mit niedrigerer Osmolarität hypotonisch genannt und die mit höherer Osmolarität wird hypertonisch genannt. Bei diesen Begebenheiten tritt der Effekt der Osmose auf.

Die dritte Möglichkeit ist ein Sonderfall der normalen Osmose, wie in Abbildung 8 dargestellt, bei der das Konzentrationsgefälle so nicht ausgeglichen werden kann (a). Ein Gleichgewicht stellt sich hier erst ein, wenn durch den hydrostatischen Druck genauso viele Lösungsmittelteilchen durch die Membran zurückgedrückt werden, wie durch die Osmose hineindiffundieren (b). Der Druck, der auf eine Lösung ausgeübt werden muss, um der Osmose genau entgegenzuwirken, wird als osmotischer Druck bezeichnet (c).

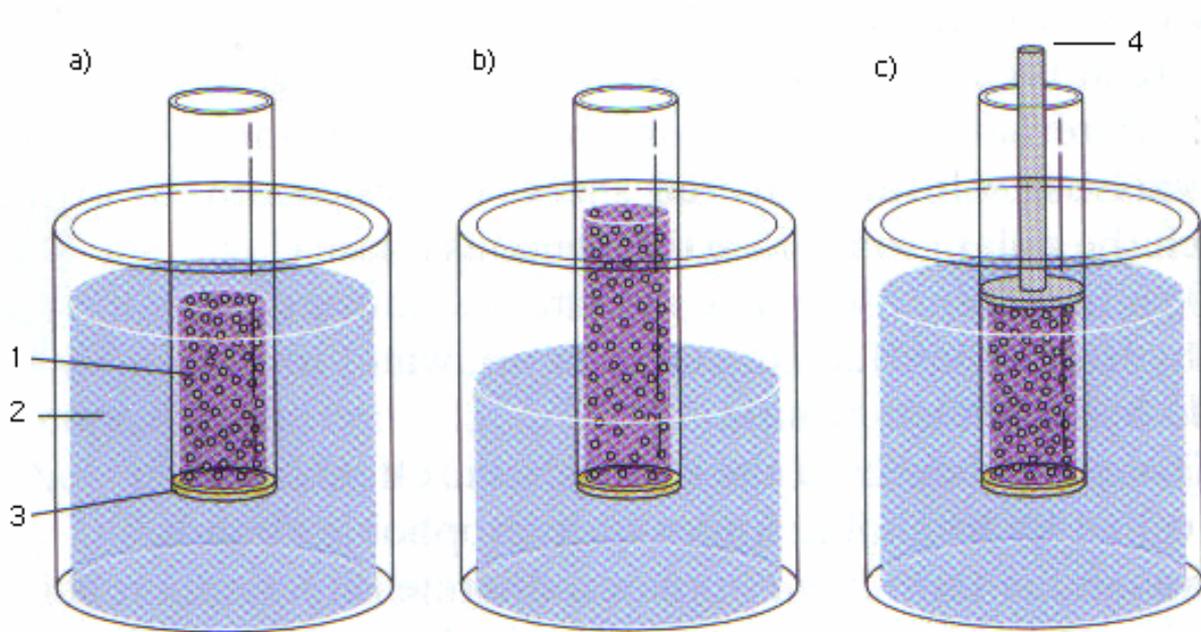


Abb.8: Der osmotische Druck^[10]

Beschriftung: 1 = konzentrierte Lösung, 2 = Wasser, 3 = Semipermeable Membran, 4 = Druck

Der osmotische Druck hängt nur von der Zahl der gelösten Teilchen sowie der Temperatur ab und kann wie folgt berechnet werden:

$$p_{osm} = c \cdot R \cdot T \quad (6)$$

mit: p_{osm} = osmotischer Druck [bar]

Also hat eine einmolare Lösung (egal um welchen Stoff es sich handelt) einen osmotischen Druck von 24,5 bar.

Bei dissoziierenden Verbindungen, wie Natriumchlorid, muss die Gl.6 um den Faktor z erweitert werden:

$$p_{osm} = z \cdot c \cdot R \cdot T \quad (7)$$

mit: z = Teilchenzahl, die in Lösung aus einer Formeleinheit entstehen

Im Fall von NaCl wäre $z = 2$ und bei $c = 1 \text{ mol/L}$ sowie $T = 25^\circ\text{C}$ ergibt sich:

$$p(\text{Na}^+ \text{Cl}^-)_{osm} = 2 \cdot 1 \cdot 8,314 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 298,15 \text{K} = 49,58 \text{bar}$$

In der Realität muss man für z häufig einen empirisch bestimmten Wert nehmen, da die Moleküle nicht immer komplett dissoziieren. Für NaCl nimmt man den empirisch ermittelten Wert von 1,86 statt 2. Damit würde der osmotische Druck auf 46,1 bar fallen.

3.2 Osmose in der Natur

Die Auswirkungen der Osmose sind besonders in der Zellbiologie wichtig, wie sie in Abbildung 9 zu sehen ist. Zellen enthalten im Allgemeinen eine höhere Konzentration an Molekülen und Ionen als in ihrer extrazellulären Umgebung. Dies führt zur Wasseraufnahme der Zelle und kann diese zum Platzen bringen (z.B. Kirschen am Baum können bei Regen platzen), wenn kein entsprechender Ausgleich stattfindet. Andersherum schrumpfen Zellen in hypertonischer Lösung. Erhöht man z.B. die Ionenkonzentration in der Umgebung von Zellen (z.B. beim Zuckern von Früchten), kann dies zum Wasseraustritt aus den Zellen führen.

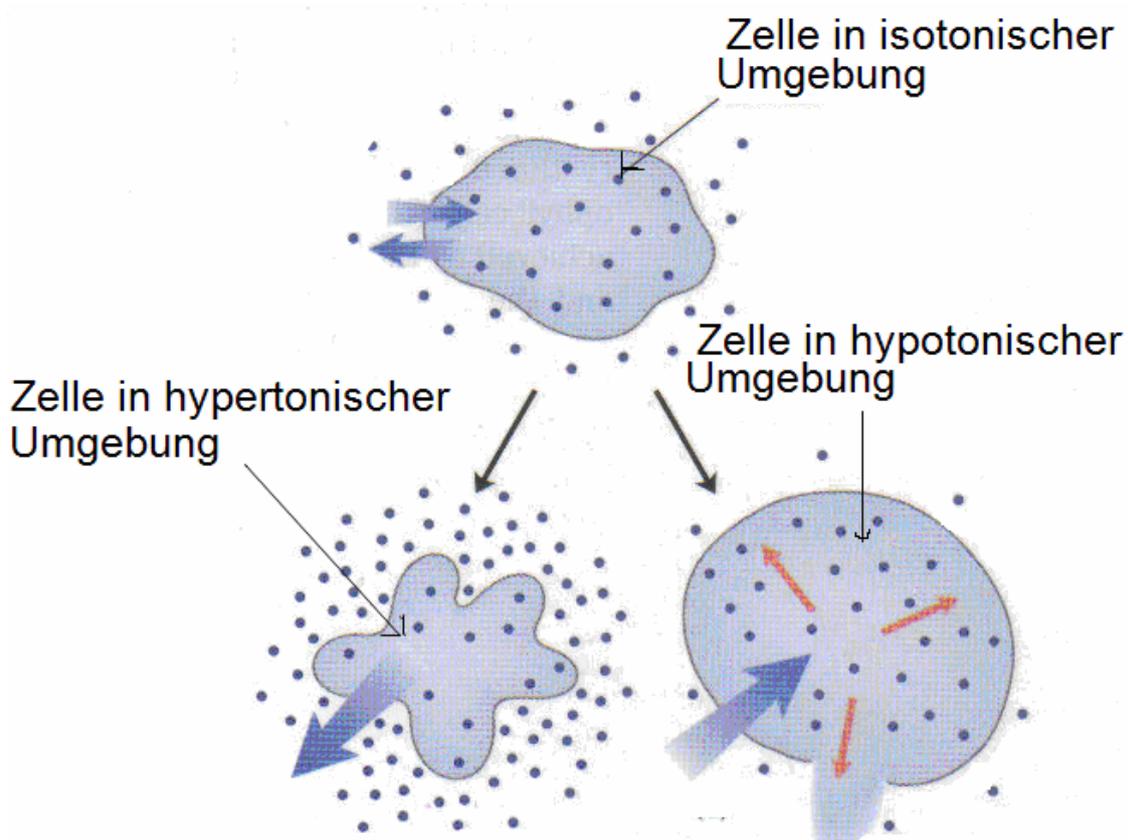


Abb.9: Auswirkungen der Osmose auf Zellen^[6]

Um diesem entgegenzuwirken haben Pflanzen und Bakterien besonders dicke und stabile Zellwände, die diesem Druck standhalten können, der bis zu dem des zehnfachen von Autoreifen betragen kann. Die extrazelluläre Zellumgebung bei Tieren und Menschen hat ungefähr dieselbe Osmolarität wie die intrazelluläre Umgebung. Außerdem können die Zellen einige Ionen (z.B. Na^+) herauspumpen, um das Gleichgewicht beizubehalten.

3.2.1 Plasmolyse

Werden lebende Pflanzenzellen in eine konzentrierte Salz- oder Zuckerlösung gegeben, löst sich das Protoplasma von der Zellwand ab und zieht sich zusammen, während die Zellwand stabil bleibt. Dieser Vorgang wird als Plasmolyse bezeichnet und ist in Abbildung 10 (B) gezeigt. Lösungen, die dies bewirken nennt man Plasmolytika. Es hängt von der Art und Konzentration des Plasmolytikums ab, wie genau die Plasmolyse verläuft. Bei der Konvexplasmolyse (Abb.10C), die durch Kaliumionen hervorgerufen wird, löst sich der Protoplast bis auf eine kleine Stelle von der Zellwand und wird rundlich konvex. Die Konkavplasmolyse (Abb.10D), wird durch Calciumionen ausgelöst. Dabei löst der Protoplast sich nur an einigen Stellen und es entstehen Einbuchtungen.

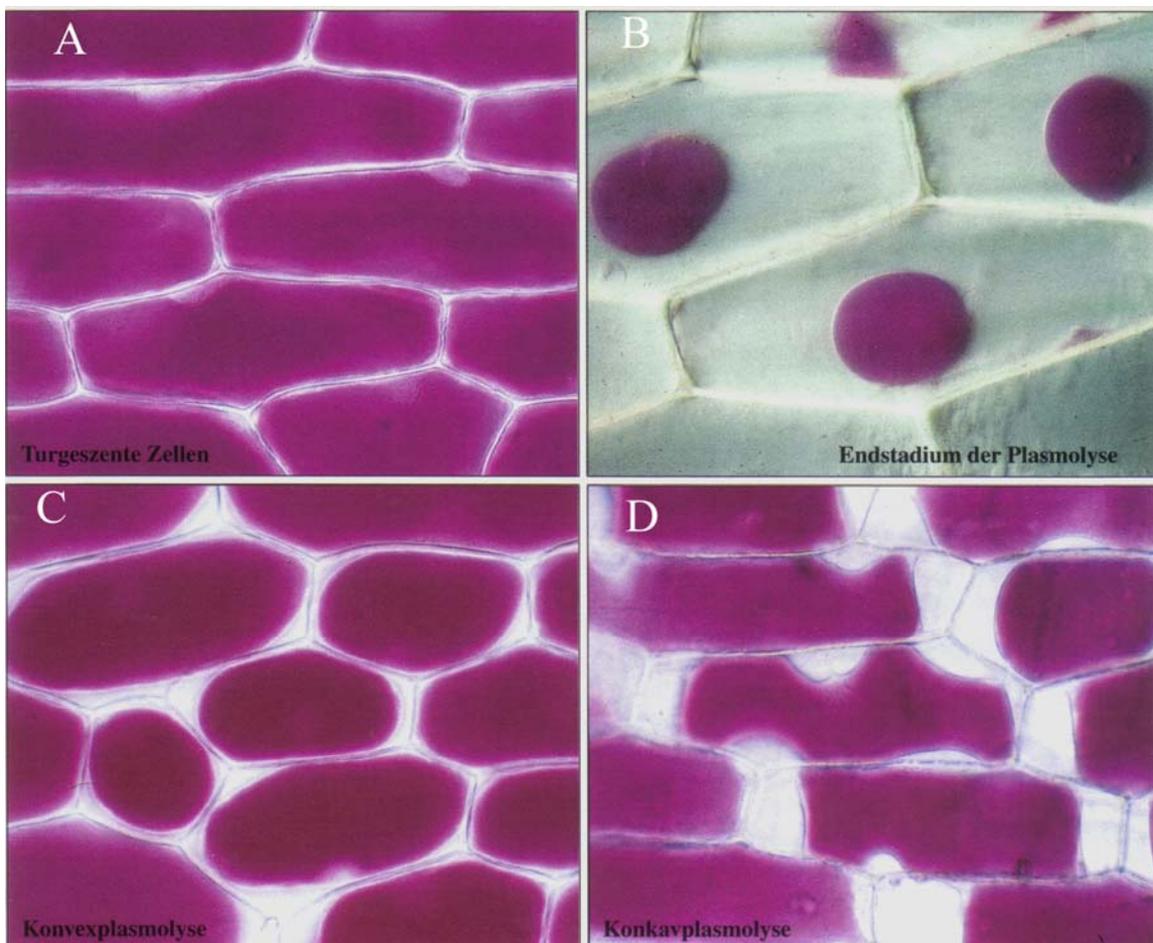


Abb.10: Plasmolyse^[7]

Der Vorgang lässt sich leicht rückgängig machen, indem man Wasser hinzugibt, solange die Zellen noch leben. Dieser Vorgang wird Deplasmolyse genannt.

In einer hypotonischen Lösung kommt es solange zur Wasseraufnahme, bis der Gegendruck der Zellwand diesem entgegenwirkt. Es führt insgesamt zu einem Spannungszustand, der als Turgor bezeichnet wird (Abb.10a).

Der Turgor hält Pflanzen aufrecht und stabil. In den meisten Pflanzenzellen erreicht der Turgor einen Wert zwischen 5 und 20 bar (zum Vergleich: ein Autoreifen hat ungefähr 2 bar Druck).

3.2.2 Osmotische Zustandsgleichung

Man kann eine Zelle als ein relativ simples osmotisches System beschreiben. Der Zellsaft im Inneren verhält sich gegenüber dem durch die Zellwand eindringenden Wasser hypertonisch. Tonoplast, protoplasmatischer Wandbelag und Plasmalemma verhalten sich wie eine semipermeable Membran. Dadurch besteht ein osmotisches Potential. Im Normalfall zieht die osmotische Saugkraft (S) Wasser in die Vakuole, bis der Turgordruck (O) mit dem Wanddruck (W) der Zellwand im Gleichgewicht steht. Dies sorgt für die Festigkeit der pflanzlichen Zellverbände. Die osmotische Zustandsgleichung lässt sich wie folgt definieren:

$$S = O - W \quad (8)$$

In Abbildung 11 ist der graphische Zusammenhang zwischen den osmotischen Zustandsgrößen der Pflanzenzelle dargestellt.

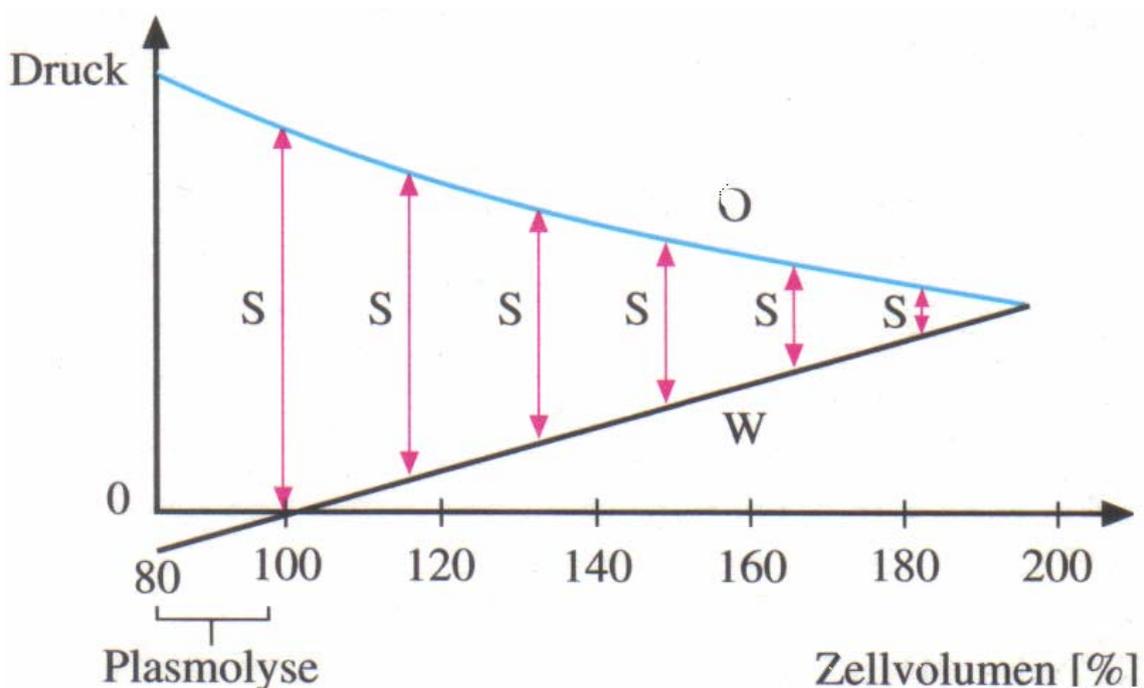


Abb.11: Osmotische Zustandsgrößen der Pflanzenzelle^[7]

3.2.3 Das Donnan-Gleichgewicht

Zwischen Zellen und Umgebung stellt sich ein Donnan-Gleichgewicht ein, wenn die trennende Membran nicht nur für Wasser, sondern auch für kleine, geladene Ionen durchlässig ist. Das Donnan-Gleichgewicht baut sich im Organismus an allen Zellmembranen auf.

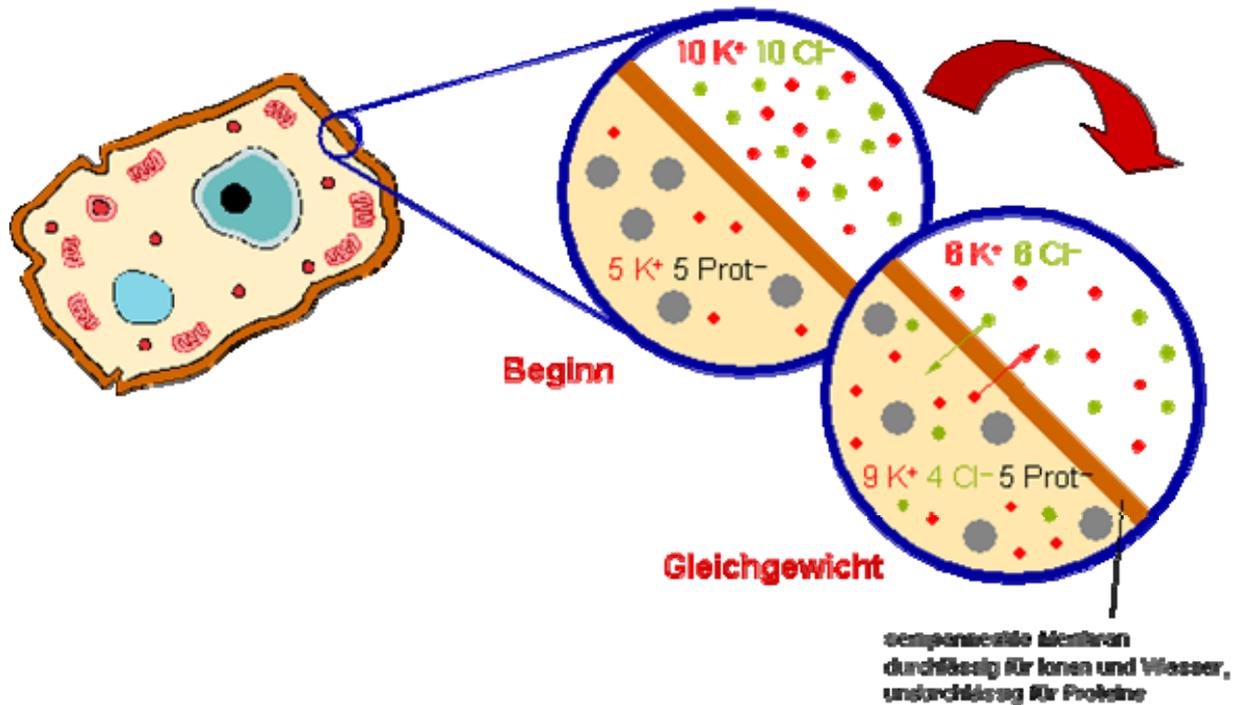


Abb.12: Schema des Donnan-Gleichgewichts^[17]

In Abbildung 12 ist das Schema des Donnan-Gleichgewichts dargestellt, wobei sich zu Beginn in der Zelle negativ geladene Proteine und als K^+ Gegenionen befinden. Auf der anderen Seite der Membran befindet sich eine Kaliumchlorid-Lösung. Da die Gesamtkonzentration der umgebenden Lösung höher ist, steigt somit der osmotische Druck dort an. Weil die Membran für Kalium- und Chlorid-Ionen durchlässig ist, diffundieren die kleinen geladenen Ionen so lange in die Zelle, bis sich das folgende Ionenprodukt ausgleicht:

$$[K^+](innen) \cdot [Cl^-](innen) = [K^+](aussen) \cdot [Cl^-](innen) \quad (9)$$

Da die beiden Lösungen in sich neutral bleiben müssen entsteht ein Ungleichgewicht bei der Ionenverteilung, das Donnan-Potential ΔE :

$$\Delta E = -0,06V \cdot \log \frac{[K^+](innen)}{[K^+](aussen)} \quad (10)$$

Aufgrund der Ionenverschiebung befinden sich jetzt mehr Ionen in der Zelle als außen, so dass der osmotische Druck in der Zelle jetzt größer ist.

3.3 Technische Anwendungen der Osmose

3.3.1 Dialyse

Ein wichtiges Anwendungsgebiet in der Medizin ist die Dialyse. Bei Nierenversagen kann der Körper einige Stoffe, wie Harnstoff oder Kaliumionen nicht mehr ausscheiden, was zum Tod führen kann. Das Blut des Patienten wird mehrere Stunden durch eine Maschine (künstliche Niere) geleitet, in der ein System von semipermeablen Porenmembranen vorliegt. Durch die Membranen können kleine Teilchen diffundieren, aber keine großen, wie Erythrozyten. Die Schadstoffe werden so aus dem Körper des Patienten ausgeschwemmt. Allerdings werden hierbei auch für den Körper wichtige Stoffe entfernt, weshalb die Lösung in der künstlichen Niere zusätzlich an den Patienten angepasste Nährstoffe enthalten, die durch die Membran ins Blut wandern. Eine Darstellung der transportierten Teilchen bei der Dialyse ist in Abbildung 13 gezeigt.

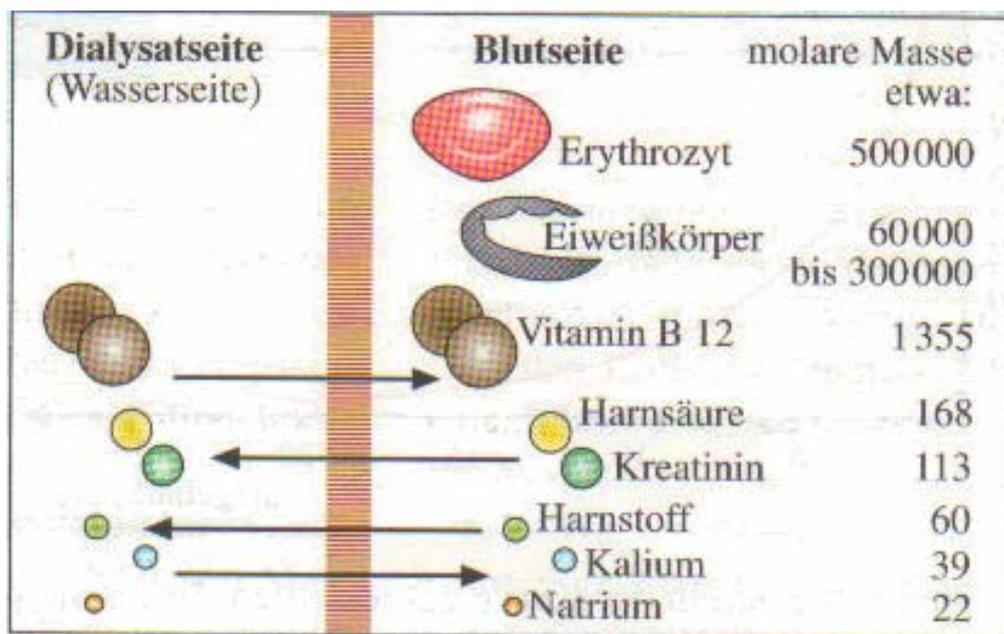


Abb.13: Teilchentransfer bei der Dialyse^[7]

3.3.2 Umkehrosmose

Zur Wasseraufbereitung wird häufig die Umkehrosmose angewendet, welche ein physikalisches Verfahren darstellt. Es wird ein Behälter mit einer nur für Wasser durchlässigen Membran verwendet. In diesem Behälter ist in einer Hälfte das aufzubereitende Wasser, z.B. Meer- oder Abwasser, auf das ein Druck ausgeübt wird, der höher ist als der osmotische Druck sein muss, der in Abbildung 14 mit p gekennzeichnet ist. Jetzt diffundieren die H_2O -Moleküle durch die Membran. Dabei steigt der osmotische Druck umso mehr, je höher der Konzentrationsunterschied wird. Deshalb ist es zweckmäßig die Konzentration der gelösten Teilchen im ersten Behälter nicht zu hoch werden lassen, indem diese konstant entfernt werden. Somit wird der natürliche Prozess der Osmose umgekehrt.

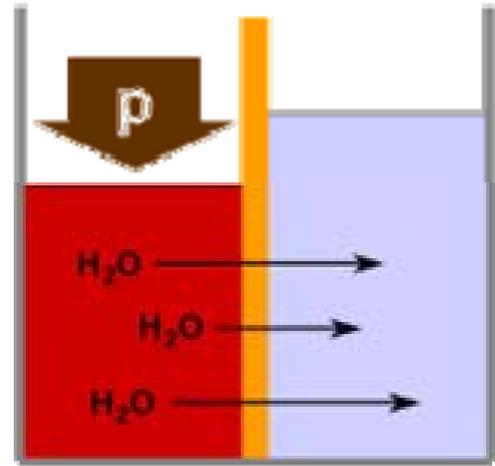


Abb.14: Schema der Umkehrosmose^[18]

Großtechnische industrielle Anlagen zur Umkehrosmose werden z.B. für die Meerwasserentsalzung eingesetzt, damit auf kleineren Inseln oder überall dort, wo Trinkwasser knapp ist, eine genügende Wasserversorgung gewährleistet wird.

3.3.3 Das Osmosekraftwerk

Der Unterschied im Salzgehalt zwischen Meerwasser und Süßwasser könnte in der Zukunft genutzt werden, um mit Hilfe von Osmosekraftwerken Strom zu gewinnen. Den theoretischen Ansatz dazu hat man bereits vor ca. 30 Jahren entwickelt. Damals war es aber technisch nicht möglich, da die hierfür notwendigen Membranen nicht produziert werden konnten. Heutzutage ist besonders Norwegen führend in der Entwicklung von Osmosekraftwerken. Dort sind 2005 zwei Pilotanlagen in Arbeit gegangen, um zu beweisen, dass diese Form der Energiegewinnung wirtschaftlich und vor allem umweltschonend, d.h. ohne CO_2 – Ausstoß, ist. Um Osmose zur Energiegewinnung zu nutzen, benötigt man zwei nah beieinander liegende Wasserquellen, die einen möglichst hohen Unterschied im Salzgehalt haben müssen. Hierfür bieten sich Flussmündungen an, da man auf das stark salzhaltige Meerwasser und das Süßwasser des Flusses zurückgreifen kann. Nimmt man zwei große Bassins, getrennt durch eine semipermeable Membran die Wasser durchlässt, Salz jedoch zurückhält, durchdringt das Süßwasser die Membran und das Volumen des Meerwasserbassins steigt. Ist das Bassin abgeschlossen, kann nur noch der Druck steigen, wie in Abbildung 15 zu sehen ist.

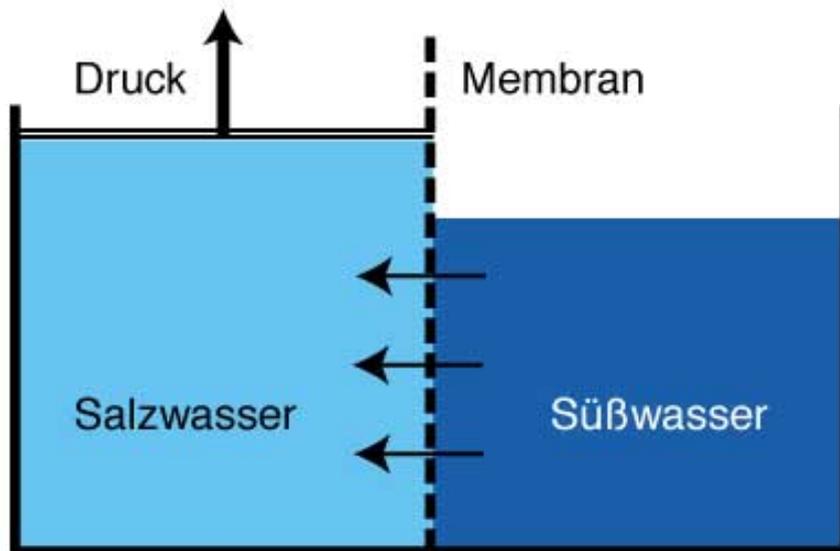


Abb.15: Grundprinzip des Osmosekraftwerks^[19]

Theoretisch gesehen kann dieser Druck bis auf 27 bar steigen, soviel ist aber für Osmosekraftwerke nicht nötig. Damit dies aber kommerziell genutzt werden kann, ist eine Leistung von ca. 5 Watt pro Quadratmeter Membran erforderlich. Derzeitige Membranen verfügen über eine Leistung von ca. 2 Watt pro Quadratmeter. Da man zur Erzeugung von 1 Megawatt Strom bereits 20000 m² Membran benötigt, werden derzeit Röhrenmodule entwickelt, in denen aufgewickelte Membranen stecken. In Norwegen rechnet man damit, die ersten effizienten Anlagen im Jahr 2015 betreiben zu können.

In Abbildung 16 ist das Schema eines Osmosekraftwerkes dargestellt.

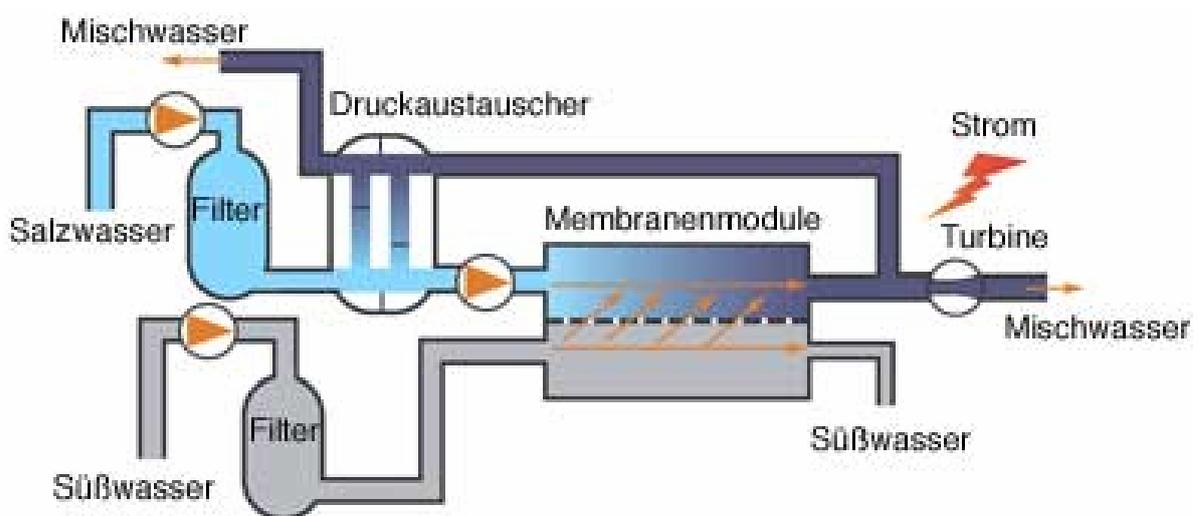


Abb.16: Schema eines Osmosekraftwerkes^[19]

Bevor man Salz- und Süßwasser in das Kraftwerk leitet, werden beide gefiltert, um Rückstände auszusortieren. Anschließend dringen 80 bis 90 Prozent des Süßwassers (grau) in das Salzwasserbassin ein, wodurch sich der Druck stark erhöht. Von dieser Mischung (dunkelblau) wird nur ein Drittel durch die Turbine zur Stromerzeugung weitergeleitet. Der Rest wird über einen Druckaustauscher zurückgeführt, damit man ein günstiges Druck- und Durchflussverhältnis erreicht. Optimale Bedingungen herrschen bei Drücken von ca. 11-15 bar. Das entstehende Mischwasser kann ohne Umweltprobleme ins Meer gepumpt werden, da es während des Prozesses nicht verunreinigt wird. Dadurch sind Osmosekraftwerke sehr umweltschonend, da sie als einzige Ressource Wasser benötigen, welches ohne Probleme entsorgt werden kann.

4. Fazit

Die Auseinandersetzung mit dem Thema „Membranen und Osmose“ hat gezeigt, dass die Natur Ideen für technische Anwendungen liefert. Ausgehend von den biologischen Membranen wurden zahlreiche technische Verfahren verbessert und weiterentwickelt. Die aktuellen Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf das Gebiet der immobilisierten Flüssigmembranen, um großtechnische Anwendungen dieser Technik zu erzielen. Weiterhin werden Membranverfahren bei der Verarbeitung von Fetten und Ölen entwickelt, um einen Beitrag zu umweltverträglichen Produktionsverfahren zu leisten. Diese vielfältigen Anwendungen von Membranen werden auch in der Osmosetechnik eingesetzt. Durch Osmoseverfahren lassen sich besonders umweltschonende Kraftwerke entwickeln. Es können moderne Trinkwasseraufbereitungsanlagen betrieben werden und in der Medizin ist die Anwendung der Osmosetechnik seit Jahrzehnten erprobt. Trotz der Fortschritte in den letzten Jahren ist vor allem auf dem Gebiet der Verfahrenstechnik noch viel zu erforschen und bietet eine hohes Potential an Möglichkeiten.

5. Literaturverzeichnis

Bücher:

- [1] Alberts B., Johnson A., Lewis J., Raff M., Roberts K., Walter P., *The Cell*, 4. Aufl., Garland Science, New York, 2002
- [2] Butt H.-J., Graf K., Kappl M., *Physics and Chemistry of Interfaces*, Wiley-VCH, Weinheim, 2003
- [3] Dialer, Onken, Leschonski, *Grundzüge der Verfahrenstechnik und Reaktionstechnik*, Carl Hanser Verlag, München, 1986
- [4] Eierdanz H., *Perspektiven nachwachsender Rohstoffe in der Chemie*, VCH Verlag, Weinheim, 1996
- [5] Grassmann P., Widmer F., *Einführung in die thermische Verfahrenstechnik*, 2.Aufl., Walter de Gruyter, Berlin, 1974
- [6] Nelson D.L., Cox M.M., *Lehninger Principles of Biochemistry*, 3. Aufl., Worth Publishers, New York, 2000
- [7] Scharf K.-H., Sebald F., *Stoffwechselfysiologie*, Neubearbeitung, Schroedel Verlag, Hannover, 1999
- [8] Schwuger M. J., *Lehrbuch der Grenzflächenchemie*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1996
- [9] Voet D., Voet J.G., Pratt C.W., *Lehrbuch der Biochemie*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2002
- [10] Voet D., Voet J.G., Pratt C.W., *Fundamentals of Biochemistry*, John Wiley & Sons, New York, 1999
- [11] Weissermehl K., Arpe H.-J., *Industrielle Organische Chemie*, 4. überarbeitete Aufl., VCH Verlag, Weinheim, 1994

Dissertationen/Broschüren/Artikel:

- [12] Hwang S.-T., *Nonequilibrium Thermodynamics of Membrane Transport*, AIChE Journal (2004), 862-870
- [13] Paul D., *Ergebnisse der Membranforschung und -technik*, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht, 1995
- [14] Theis J.I., *Entwicklung und Anwendung von katalytischen Polymere Membranen*, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2000

Internet:

- [15] Anna-Lena Gehrmann, *Sauberen Strom mit Osmose erzeugen*,
<http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,409045,00.html>, 20.06.06
- [16] *Biomembranen*, <http://www.u-helmich.de/bio/cyt/reihe03/membran01.html>, 20.06.06
- [17] *Donnan-Gleichgewicht*,
http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/4/cm/phasen/diffosm_med.vlu/Page/vsc/de/ch/4/cm/phasen/donnan_gleichgewicht.vscml.html, 20.06.06
- [18] *Exkurs: Lungenödem*,
http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/4/cm/phasen/diffosm_med.vlu/Page/vsc/de/ch/4/cm/phasen/lungenoedem.vscml.html, 20.06.06
- [19] Max-Planck-Institut für Plasmatechnik,
http://www.ipp.mpg.de/ippcms/ep/ausgaben/ep200503/0305_osmosekraftwerk.html, 20.06.06
- [20] *Osmose*
http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/4/cm/phasen/diffosm_med.vlu/Page/vsc/de/ch/4/cm/phasen/osmose.vscml.html, 20.06.06
- [21] *Thermodynamik des passiven Transports*,
http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/8/bc/vlu/transport/pass_transport.vlu/Page/vsc/de/ch/8/bc/transport/diffusion3.vscml.html, 20.06.06
- [22] Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Micellen.png>, 20.06.06
- [23] Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Doppellipidschicht.jpg>, 20.06.06
- [24] http://sun.menloschool.org/~cweaver/cells/c/cell_membrane/fluid_mosaic.jpg, 20.06.06

6. Anhang

6.1 Demonstrationsversuche zu Membranen und Osmose

Als Demonstrationsversuche werden zwei Versuche ausgewählt, die den Ablauf der Osmose und Diffusion Durch Membranen veranschaulichen.

6.1.1 Phenolphthalein-Versuch

Materialien:

- Standzylinder, Stativ und Glasschüssel
- Phenolphthaleinlösung
- NaOH-Lösung
- Einmachfolie

Durchführung:

1. Der Standzylinder wird zu zwei bis drei Zentimeter mit verdünnter Phenolphthaleinlösung gefüllt, dann mit einer Einmachfolie dicht verschlossen (mit Bindfaden abschnüren). Die Folie ist recht großzügig zu bemessen, damit beim Umdrehen des Zylinders keine Lösung heraustropfen kann.
2. Nun wird der Standzylinder mit der Phenolphthaleinlösung in ein Stativ eingespannt und dann umgedreht über der Glasschüssel befestigt.
3. Der Standzylinder wird so abgesenkt, dass er im Wasser steht. Den Boden der Glasschüssel sollte die Folie allerdings nicht berühren.
4. Dann wird etwas Natronlauge zu dem Wasser in der Glasschüssel gegossen, so dass eine stark verdünnte NaOH-Lösung entsteht.

Beobachtungen:

1. Die Phenolphthalein-Lösung wird recht schnell intensiv rot, während die Natronlauge sehr lange braucht, um leicht rot zu werden.
2. Bei Beendigung des Versuchs sieht man eine intensivrote Färbung im Standzylinder, lediglich blassrote Färbung in der Natronlauge.

Deutung:

Die Einmachfolie ist eine semipermeable Membran, d.h. sie ist durchlässig für kleine Moleküle und Ionen, nicht aber für große Moleküle oder Ionen. Wenn der Standzylinder in die Natronlauge abgesenkt wird, so können die kleinen Hydroxid-Ionen der Lauge leicht durch die Folie in die Phenolphthalein-Lösung eindringen. Phenolphthalein reagiert dann mit den Hydroxid-Ionen zu einem intensiv roten Farbstoff.

Die Phenolphthalein-Moleküle andererseits sind ziemlich groß und haben große Schwierigkeiten, die Membran zu passieren. Einige wenige Moleküle dringen jedoch in die Natronlauge ein und sorgen dort für die leichte Rosafärbung.

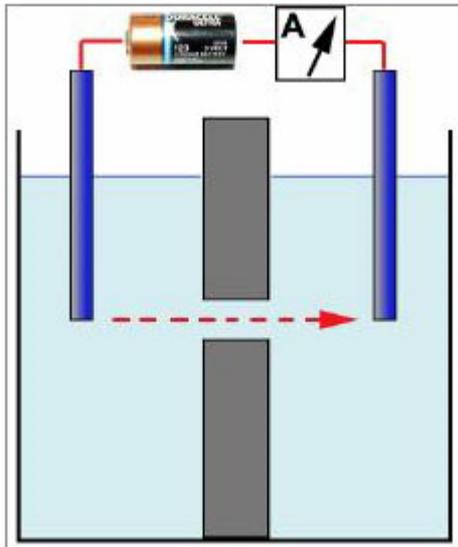
6.1.2 Versuch zu Biomembranen

Materialien:

- Amperemeter
- Elektrisch leitende Salzlösung, Wasser
- Abtrennwand mit Spalte
- Elektroden/Stromquelle
- Öl/Fett
- Gramacidin A
- Pipette

Durchführung/Aufbau/Deutung:

1.)



Ein Glasgefäß mit einer elektrisch leitenden Salzlösung wird durch eine nicht-leitende Wand in zwei Hälften geteilt. In der Wand befindet sich aber ein kleines Loch. Wenn man nun eine Spannung anlegt und den durch das Wasser fließenden Strom misst, so zeigt das angeschlossene Amperemeter einen Ausschlag. Es fließt Strom durch das Wasser.

Abb.17: Bei dieser Versuchsanordnung fließt ein Strom durch die Wand^[16]

2.)

Der Versuch wird nun etwas abgewandelt. Und zwar streicht man mit einem Fettpinsel über das Loch in der Trennwand. Man bringt eine künstliche Lipidschicht auf, die das Loch sozusagen verschließt.

Es fließt kein Strom mehr, wenn man eine Spannung anlegt. Die Lipidschicht verhält sich wie ein elektrischer Isolator, sie kann keinen Strom leiten. Eine Lipidschicht ist impermeabel für Ionen.

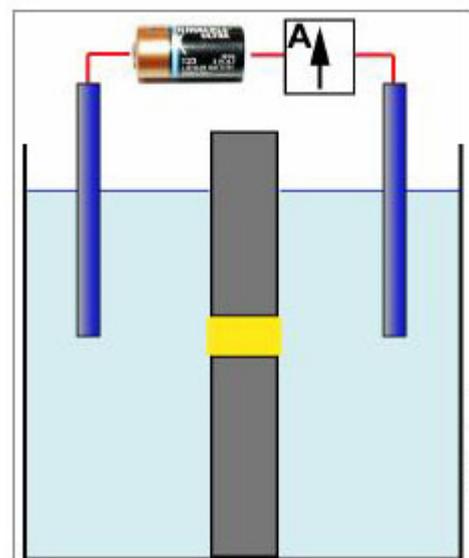


Abb.18: Das Loch in der Wand wird durch eine künstliche Lipid-Doppelschicht verschlossen^[16]

3.)

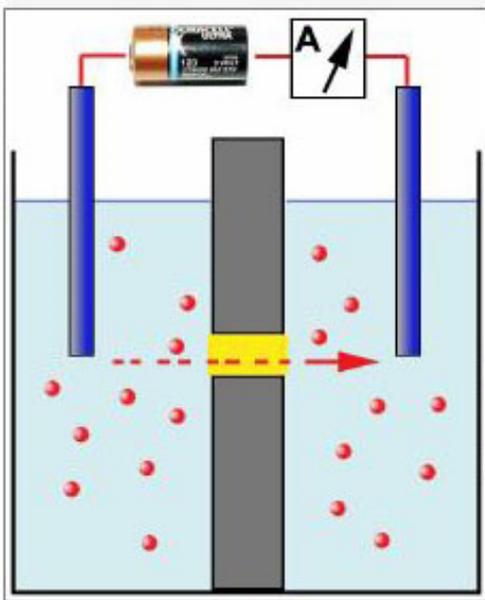


Abb.19: Durch die Gamicidin-A-Moleküle wird die Lipid-Doppelschicht wieder leitfähig^[16]

Der Versuch wird nun ein weiteres Mal modifiziert. Mit einer Pipette wird in beide Gefäßhälften etwas von dem Stoff Gamicidin-A gegeben. Gamicidin-A ist ein Protein, welches aus bestimmten Bakterien gewonnen werden kann. Es sitzt in der Membran dieser Bakterien. Kurze Zeit nach dem Hinzufügen des Gamicidins steigt die Stromstärke wieder an. Die künstliche Membran wird leitend.

Setzt man links und rechts sehr wenige Gamicidin-A-Moleküle zu, so ist die Leitfähigkeit allerdings ziemlich sprunghaft. Mal kann man einige Milliampere messen,

dann wieder nicht. Kurze Zeit später misst man wieder einen Strom, dann wieder keinen. Der Grund: Jedes Gamicidin-Molekül ist nur so lang wie eine

Lipidschicht der Lipid-Doppelmembran breit ist. Zwei Gamicidin-Moleküle müssen genau hintereinander liegen, damit ein Kanal entsteht, der durch die ganze Lipid-Doppelschicht geht. Erst dann können Ionen von der einen Seite der Membran zur anderen gelangen, und erst dann zeigt das Amperemeter einen Ausschlag an.

Das eigentliche Ergebnis dieses Versuchs ist aber folgendes: Offensichtlich sind die Moleküle der Membran ständig in Bewegung. Anderes könnte man sich das Verhalten der Gamicidin-Kanäle nicht erklären. Mal besteht ein ganzer Kanal, mal wieder nicht. Die Gamicidin-Moleküle bewegen sich, weil sich die Lipidmoleküle der Doppelschicht bewegen.