

**MEMBRANTECHNIK***Engineering, Auslegung und Optimierung von Membranprozessen für Industrie und Forschung.*

---

# Adsorption

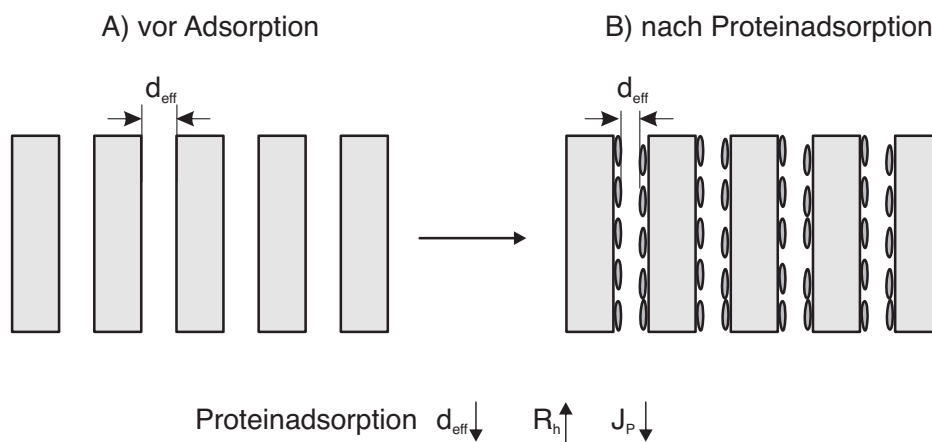
<b>1 Adsorption</b>	<b>2</b>
1.1 Ultrafiltration mit polymeren Membranen . . . . .	2
1.2 Einfluss der Membranoberfläche auf die Adsorption . . . . .	4
1.3 Oberflächenladung und isoelektrischer Punkt . . . . .	5
<b>2 Proteinadsorption bei Ultra- und Mikrofiltration</b>	<b>6</b>
2.1 Adsorption amphoterer Stoffe an polymeren UF-Membranen . . . . .	6
<b>3 Chemische Reinigungsmittel</b>	<b>7</b>
3.1 Wasserflux nach Reinigung . . . . .	8
<b>4 Affinitätsmembranen</b>	<b>9</b>

# 1 Adsorption

In der Membrantechnik beschreibt Adsorption die Anhaftung von Ionen, Molekülen oder Partikeln an der Membranoberfläche.

Dieser Vorgang kann sowohl an der äusseren als auch an der inneren Oberfläche der Membran stattfinden. Die Adsorption führt zu spezifischen Effekten an der Membranoberfläche, welche die Transporteigenschaften der Membran beeinflussen können.

Adsorptionsbedingte Effekte können zu einer Erhöhung oder Verringerung des Fluxes führen und den Rückhalt bestimmter Stoffe beeinflussen.



**Abbildung 1.** Richtig eingesetzt, verwirklicht die Membrantechnik den Grundsatz: Was für den einen ein Abfall ist, kann für den anderen ein Rohstoff sein.

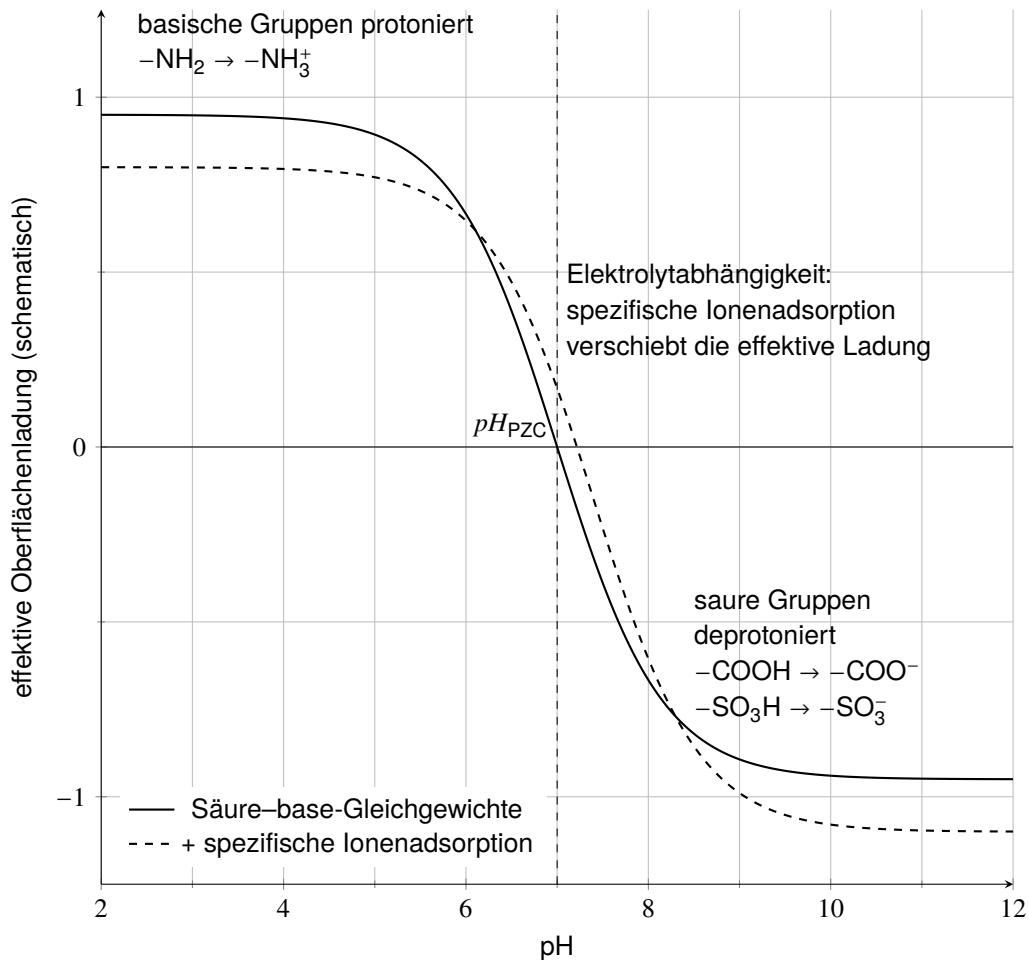
## 1.1 Ultrafiltration mit polymeren Membranen

Polymere Ultrafiltrationsmembranen sind semipermeable Membranen aus polymeren Werkstoffen, die Moleküle und Partikel oberhalb einer bestimmten Grösse zurückhalten, während Wasser und niedermolekulare Stoffe hindurchtreten.

Die Oberflächeneigenschaften der eingesetzten Materialien beeinflussen massgeblich Adsorptionsprozesse.

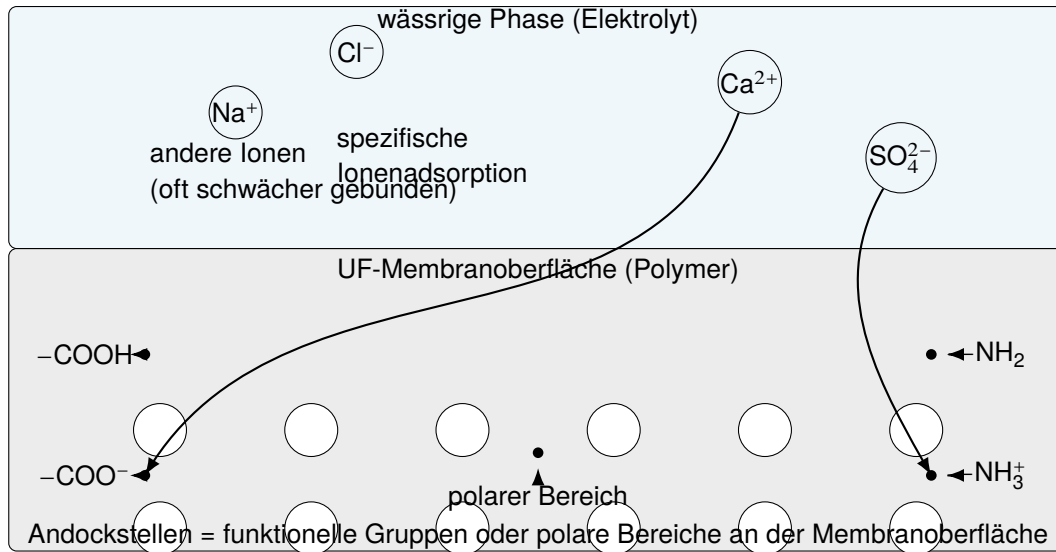
Hydrophobe Materialien wie Polysulfon (PSU), Polyethersulfon (PES) und Polyvinylidenfluorid (PVDF) zeigen eine erhöhte Adsorption organischer Stoffe, während hydrophile Celluloseacetat-Membranen eine geringere Adsorptionsneigung aufweisen.

Die Oberflächenladung polymerer Ultrafiltrationsmembranen ist meist pH-abhängig. Ursache sind protolytisch aktive Funktionalitäten an der Membranoberfläche. Dazu zählen saure Gruppen (z. B. Carboxyl- oder Sulfongruppen), die bei steigendem pH-Wert deprotonieren und dadurch negative Oberflächenladungen erzeugen, sowie basische Gruppen (z. B. Aminfunktionen), die bei tiefem pH-Wert protoniert vorliegen und positive Ladungen bewirken. Der pH-Wert bestimmt somit das Gleichgewicht zwischen protonierten und deprotonierten Oberflächenzentren und damit die resultierende Nettoladung.



**Abbildung 2.** Schematische Darstellung der pH-Abhängigkeit der Membranoberflächenladung durch Protonierung/Deprotonierung funktioneller Gruppen sowie der möglichen Verschiebung durch spezifische Ionenadsorption aus der wässrigen Phase.

Der pH-Wert einer Lösung gibt an, wie viele Protonen ( $H^+$ ) in der Lösung vorhanden sind. Bei tiefem pH-Wert ist die Konzentration an Protonen hoch, die Lösung ist sauer. Unter diesen Bedingungen werden Teilchen oder funktionelle Gruppen bevorzugt protoniert, das heisst, sie nehmen ein Proton auf. Bei hohem pH-Wert ist die Protonenkonzentration niedrig, die Lösung ist basisch. In diesem Fall geben Teilchen oder funktionelle Gruppen eher ein Proton ab, was als Deprotonierung bezeichnet wird. Protonierung und Deprotonierung stehen somit in direktem Zusammenhang mit dem pH-Wert der Lösung und bestimmen die elektrische Ladung vieler gelöster Stoffe und Oberflächen.



**Abbildung 3.** Schematische Darstellung von Andockstellen an einer polymeren UF-Membran und der spezifischen Adsorption ausgewählter Ionen aus der wässrigen Phase.

Als Andockstellen an polymeren Ultrafiltrationsmembranen bezeichnet man bestimmte Bereiche an der Membranoberfläche, an denen Teilchen aus dem Wasser anhaften oder mit der Oberfläche wechselwirken können. Dabei handelt es sich vor allem um funktionelle Gruppen des Polymermaterials, zum Beispiel Carboxyl-, Sulfon- oder Amingruppen, sowie um polare Bereiche der Oberfläche. Diese Andockstellen können geladene oder ungeladene Teilchen wie Ionen, Moleküle oder Proteine anziehen. Je nach Art der Andockstelle, dem pH-Wert und den im Wasser gelösten Stoffen können dort Adsorption, Protonierung oder spezifische Ionenbindung stattfinden. Dadurch beeinflussen Andockstellen die Oberflächenladung, den Stofftransport und das Foulingverhalten der Membran.

Der isoelektrische Punkt einer polymeren Ultrafiltrationsmembran ist definiert als der pH-Wert, bei dem die Nettoladung der Membranoberfläche null ist. An diesem Punkt kompensieren sich positive und negative Oberflächenladungen, sodass das elektrokinetische Potential der Membran verschwindet. Der isoelektrische Punkt kann experimentell als der pH-Wert bestimmt werden, bei dem das gemessene Zeta-Potential beziehungsweise das Streaming-Potential den Wert null annimmt.

Am isoelektrischen Punkt sind elektrostatische Wechselwirkungen zwischen der Membranoberfläche und geladenen gelösten Stoffen minimiert. Dies kann zu einer erhöhten Adsorption amphoterer Substanzen, insbesondere von Proteinen, sowie zu einem erhöhten Fouling-Risiko führen. Gleichzeitig ist der ladungsbedingte Rückhalt geladener Spezies in diesem pH-Bereich reduziert.

Im Gegensatz zum isoelektrischen Punkt einzelner Moleküle stellt der isoelektrische Punkt einer Membran keine feste Materialkonstante dar. Er kann durch chemische Vorbehandlung, Alterung, Adsorption von Betriebsstoffen sowie durch den Einsatz chemischer Reinigungsmittel verschoben werden.

Der isoelektrische Punkt ist daher als zustandsabhängige Kenngröße der Membranoberfläche zu verstehen und stellt einen wichtigen Parameter für die Auslegung und den Betrieb von Ultrafiltrationsprozessen dar.

## 1.2 Einfluss der Membranoberfläche auf die Adsorption

Die Neigung zur Ausbildung einer adsorbierten Schicht auf der Membranoberfläche hängt in hohem Mass von den physikalisch-chemischen Eigenschaften der Membran ab.

Adsorptionseffekte können sehr schnell ablaufen. Die charakteristische Zeit für die Proteinadsorption

an festen Oberflächen beträgt häufig nur wenige Sekunden.

Dabei spielen insbesondere die Oberflächenenergie, die chemische Zusammensetzung sowie die Mikro- und Nanostruktur der Membranoberfläche eine entscheidende Rolle. Hydrophobe Membranoberflächen zeigen typischerweise eine stärkere Adsorption organischer Substanzen als hydrophile Oberflächen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hydrophobe Wechselwirkungen die Verdrängung von Wassermolekülen an der Grenzfläche begünstigen und somit die Anlagerung organischer Moleküle erleichtern.

Insbesondere unpolare oder schwach polare Bestandteile, wie Proteine, Lipide oder andere organische Makromoleküle, weisen eine hohe Affinität zu hydrophoben Oberflächen auf. Hydrophile Membranen hingegen sind häufig von einer stabilen Hydrathülle bedeckt, welche als energetische Barriere für die Adsorption wirkt. Diese Hydrathülle reduziert die direkte Wechselwirkung zwischen Membranoberfläche und gelösten Stoffen und kann somit die Foulingneigung signifikant verringern.

Neben der Hydrophilie beeinflusst auch die Oberflächenladung der Membran das Adsorptionsverhalten maßgeblich. Geladene Membranoberflächen können mit ionischen oder polaren funktionellen Gruppen der gelösten Moleküle elektrostatisch wechselwirken. Abhängig vom pH-Wert und der Ionenstärke der Lösung kann es dabei zu anziehenden oder abstossenden Kräften kommen. Eine entgegengesetzte Ladung von Membran und Solut fördert die Adsorption, während gleichnamige Ladungen eine adsorptive Anlagerung hemmen können.

Zusätzlich können lokale Ladungsinhomogenitäten und funktionelle Gruppen auf der Membranoberfläche zu spezifischen Bindungsmechanismen führen. Das Zusammenspiel aus hydrophoben Effekten, elektrostatischen Kräften und weiteren physikalischen Wechselwirkungen bestimmt letztlich die Stärke und Stabilität der adsorbierten Schicht.

### 1.3 Oberflächenladung und isoelektrischer Punkt

Im Wesentlichen erhalten Membranen und Makrosolute in wässrigen Lösungen eine Netto-Oberflächenladung durch die Adsorption spezifischer positiver oder negativer Ionen aus der Lösung und/oder durch die Ionisierung bestimmter chemischer Gruppen an ihrer Oberfläche.

Bei neutralem pH-Wert weisen die meisten Membranen (sowie viele Makromoleküle) aufgrund der bevorzugten Adsorption negativer Ionen eine negative Nettoladung auf. In alkalischen Lösungen nimmt die Stärke dieser negativen Ladung zu, was auf eine verstärkte Anionenadsorption, eine erhöhte Ionisierung saurer Gruppen (z. B.  $-\text{COOH} \rightarrow -\text{COO}^-$ ) und/oder die Deionisierung (Deprotonierung) basischer Gruppen (z. B.  $-\text{NH}_3^+ \rightarrow -\text{NH}_2$ ) zurückzuführen ist. In sauren Lösungen treten entsprechend entgegengesetzte Effekte auf.

Wird der pH-Wert der Lösung abgesenkt, durchlaufen die meisten amphoteren Spezies einen Zustand, in dem sie keine Nettoladung mehr besitzen. Der pH-Wert, bei dem dies der Fall ist, wird als *isoelektrischer Punkt* oder *pI* bezeichnet.

Amphotere Stoffe spielen in diesem Zusammenhang eine besondere Rolle, da sie sowohl saure als auch basische funktionelle Gruppen besitzen und ihren Ladungszustand in Abhängigkeit vom pH-Wert der Lösung ändern. Die Adsorption amphoterer Stoffe kann die Oberflächenladung und die Hydrophilie der Membran verändern und damit sowohl den effektiven Porendurchmesser als auch das Trenn- und Foulingverhalten beeinflussen.

## 2 Proteinadsorption bei Ultra- und Mikrofiltration

Bei der Ultra- und Mikrofiltration proteinreicher Lösungen tritt die Adsorption von Proteinen an der Membran besonders häufig und ausgeprägt auf. Dieser Effekt ist auf die komplexe molekulare Struktur der Proteine sowie auf deren vielfältige Wechselwirkungsmöglichkeiten mit der Membranoberfläche zurückzuführen. Proteine können sich sowohl an der äusseren Membranoberfläche als auch innerhalb der Poren und der Membranmatrix anlagern. Insbesondere die intraporöse Adsorption ist kritisch, da sie zu einer irreversiblen Verblockung der Poren führen kann.

Viele in der Membrantechnik eingesetzte Materialien, wie beispielsweise Polyethersulfon, Polysulfon oder Polyvinylidenfluorid, weisen hydrophobe oder geladene Oberflächen auf. Diese Oberflächeneigenschaften begünstigen die Wechselwirkung mit Proteinen, welche sowohl hydrophobe Aminosäurereste als auch geladene funktionelle Gruppen besitzen. Die Adsorption erfolgt dabei über verschiedene physikalische und physikalisch-chemische Mechanismen.

Zu den dominierenden Wechselwirkungen zählen Van-der-Waals-Kräfte, welche eine kurzreichweitige Anziehung zwischen Proteinmolekülen und Membranoberfläche bewirken. Zusätzlich können Wasserstoffbrückenbindungen zwischen polaren Gruppen der Proteine und funktionellen Gruppen der Membran entstehen. Ein weiterer wesentlicher Beitrag zur Proteinadsorption ergibt sich aus elektrostatischen Wechselwirkungen. Diese hängen stark vom pH-Wert der Lösung, vom isoelektrischen Punkt der Proteine sowie von der Oberflächenladung der Membran ab.

Liegt eine entgegengesetzte Ladung von Protein und Membran vor, wird die Adsorption durch elektrostatische Anziehung verstärkt.

Die Adsorption von Proteinen führt zur Bildung einer Fouling-Schicht auf der Membran.

Bei gleichnamiger Ladung kann die Adsorption hingegen teilweise gehemmt werden, wobei lokale Ladungsinhomogenitäten weiterhin zu einer Anlagerung führen können. Darüber hinaus können konformationelle Änderungen der Proteine bei der Adsorption auftreten, welche die Bindung an die Membran weiter stabilisieren.

Die Proteinadsorption im Innern der Membranmatrix führt zu einer Abnahme des effektiven Porendurchmessers, einer Erhöhung des hydraulischen Widerstandes und somit zu einer Reduktion des Permeatflusses.

In fortgeschrittenen Stadien kann die adsorbierte Proteinschicht als Ausgangspunkt für weitere Ablagerungen dienen und das Fouling zusätzlich verstärken.

### 2.1 Adsorption amphoterer Stoffe an polymeren UF-Membranen

Amphotere Stoffe besitzen sowohl saure als auch basische funktionelle Gruppen und können daher je nach pH-Wert der Lösung positiv, negativ oder ungeladen vorliegen. Typische Vertreter sind Proteine, Peptide und bestimmte Polymere, die in der Membrantechnik häufig in wässrigen Systemen auftreten.

Die Adsorption amphoterer Substanzen an polymeren Ultrafiltrations- (UF-)Membranen erfolgt durch eine Kombination verschiedener Wechselwirkungen, darunter elektrostatische Anziehung oder Abstoßung, hydrophobe Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindungen sowie Van-der-Waals-Kräfte. Die Art und Stärke dieser Wechselwirkungen hängen sowohl von den Oberflächeneigenschaften der Membran als auch vom Ladungszustand der amphoterer Stoffe ab, welcher wiederum durch den pH-Wert und die Ionenstärke der Lösung bestimmt wird.

In der Nähe des isoelektrischen Punktes amphoterer Stoffe ist die elektrostatische Abstoßung reduziert, wodurch die Adsorption an der Membranoberfläche begünstigt wird. Adsorbieren amphotere Moleküle an der Membranoberfläche oder innerhalb der Poren, können sie die Oberflächeneigenschaften der Membran signifikant verändern. Dies betrifft die Oberflächenladung, die Hydrophilie sowie die effektive Porengrösse.

Diese durch Adsorption hervorgerufenen Veränderungen beeinflussen das Trennverhalten der Membran und können zu einem erhöhten Rückhalt gelöster Stoffe sowie zu einer Abnahme des Permeatflusses führen. Insbesondere bei polymeren UF-Membranen stellen amphotere Substanzen daher einen wesentlichen Faktor für Adsorptions- und Foulingprozesse dar.

Die Oberflächeneigenschaften polymerer Membranen können durch den gezielten Einsatz amphoterer Stoffe beeinflusst werden. Amphotere Moleküle besitzen sowohl saure als auch basische funktionelle Gruppen und können daher in Abhängigkeit vom pH-Wert der umgebenden Lösung unterschiedliche Ladungszustände einnehmen. Diese Eigenschaft ermöglicht eine kontrollierte Beeinflussung der Membranoberfläche, insbesondere hinsichtlich Oberflächenladung, Hydrophilie und Wechselwirkungsverhalten gegenüber gelösten Stoffen.

Eine Möglichkeit der Modifikation besteht in der physikalischen Adsorption amphoterer Substanzen an der Membranoberfläche oder innerhalb der Poren. Diese Adsorption erfolgt über elektrostatische, hydrophobe und wasserstoffbrückenbasierte Wechselwirkungen. In der Nähe des isoelektrischen Punktes amphoterer Stoffe ist die elektrostatische Abstoßung minimiert, was eine verstärkte Adsorption begünstigt. Die dadurch entstehenden Adsorptionsschichten können die effektive Oberflächenladung sowie die Benetzbarkeit der Membran signifikant verändern, sind jedoch meist reversibel und empfindlich gegenüber Änderungen von pH-Wert, Ionenstärke und hydrodynamischen Bedingungen.

Darüber hinaus können amphotere Stoffe durch chemische Fixierung oder Beschichtung dauerhaft in die Membranoberfläche integriert werden. Solche funktionalisierten Membranen weisen häufig einen pH-abhängigen Ladungsumschlag sowie verbesserte Antifouling-Eigenschaften auf. Die gezielte Einstellung der Oberflächenchemie erlaubt eine Anpassung des Trennverhaltens, kann jedoch bei unzureichender Kontrolle auch zu einer Reduktion des Permeatflusses durch Porenblockierung führen.

### 3 Chemische Reinigungsmittel

Chemische Reinigungsmittel werden in der Membrantechnik eingesetzt, um Fouling und adsorbierte Ablagerungen zu entfernen. Neben der gewünschten Reinigungswirkung können diese Chemikalien jedoch auch unbeabsichtigte Veränderungen der Membranoberfläche verursachen. Bei polymeren Membranen besteht die Gefahr, dass chemische Reinigungsprozesse nicht nur reversible Adsorptionsschichten entfernen, sondern auch die Oberflächeneigenschaften der Membran beeinflussen.

Abhängig von Art, Konzentration und Einwirkdauer der eingesetzten Reinigungsmittel können funktionelle Gruppen an der Membranoberfläche protoniert, deprotoniert oder chemisch verändert werden.

Stark saure oder alkalische Bedingungen können zu einer Verschiebung der Oberflächenladung sowie des isoelektrischen Punktes der Membran führen.

Darüber hinaus sind oxidierende Reinigungsmittel in der Lage, polymeres Membranmaterial zu degradieren und damit die Hydrophilie, die mechanische Stabilität und die effektive Porengröße nachhaltig zu verändern.

Ein weiterer kritischer Aspekt besteht in den Wechselwirkungen zwischen Reinigungschemikalien und zuvor adsorbierten oder gezielt fixierten amphoterer Stoffen. Chemische Cleanings können solche Schichten teilweise oder vollständig entfernen, den Ladungszustand amphoterer Gruppen verändern oder deren Struktur schädigen. Dadurch kann eine zuvor gezielt eingestellte Oberflächenfunktionalität der Membran verloren gehen oder nur eingeschränkt reproduzierbar sein.

Infolgedessen kann sich das Trennverhalten der Membran nach wiederholten Reinigungszyklen deutlich verändern, selbst wenn der Permeatfluss scheinbar wiederhergestellt ist. Für eine zuverlässige Bewertung von Adsorptions- und Oberflächenmodifikationseffekten ist es daher notwendig, den Einfluss chemischer Reinigungsmittel systematisch zu berücksichtigen und zu kontrollieren.

Reinigungsmittel	Einfluss auf die Membranoberfläche
Saure Lösungen	Typische Bedingungen: pH < 4 Effekte: Protonierung funktioneller Gruppen, Verschiebung der Oberflächenladung und des isoelektrischen Punktes, partielle Desorption amphoterer Stoffe Reversibilität: meist reversibel bei moderaten Bedingungen
Alkalische Lösungen	Typische Bedingungen: pH > 10 Effekte: Deprotonierung saurer und basischer Gruppen, erhöhte negative Oberflächenladung, mögliche Hydrolyse polymerer Ketten und Veränderung der Hydrophilie Reversibilität: teilweise irreversibel bei längerer Einwirkdauer
Oxidierende Mittel	Typische Bedingungen: niedrige bis moderate Konzentrationen Effekte: Oxidative Schädigung der Polymerstruktur, irreversible Veränderung der Oberflächenchemie, mögliche Porenveränderung Reversibilität: überwiegend irreversibel
Tensidhaltige Reiniger	Typische Bedingungen: variabler pH-Wert Effekte: Entfernung hydrophober Ablagerungen, mögliche Adsorption von Tensiden, Veränderung der Benetzbarkeit Reversibilität: meist reversibel nach gründlichem Spülen
Enzymatische Reiniger	Typische Bedingungen: milde pH- und Temperaturbedingungen Effekte: Selektive Entfernung biologischer Fouling-Schichten bei geringer Beeinflussung der Membranstruktur Reversibilität: weitgehend reversibel

**Tabelle 1.** Einfluss chemischer Reinigungsmittel auf die Oberflächeneigenschaften polymerer Membranen

### 3.1 Wasserflux nach Reinigung

Der Wasserfluss einer Membran wird häufig als Kenngrösse zur Bewertung des Reinigungserfolgs herangezogen. Ein erhöhter Wasserfluss nach chemischer Reinigung ist jedoch nicht zwangsläufig ein Indikator für eine vollständig gereinigte Membran. Neben der Entfernung von Fouling wird der Wasserfluss wesentlich von den Oberflächeneigenschaften der Membran beeinflusst, insbesondere von deren Hydrophilie.

Chemische Reinigungsmittel können die Hydrophilie der Membranoberfläche erhöhen, indem sie polare funktionelle Gruppen aktivieren oder erzeugen oder hydrophobe Ablagerungen chemisch modifizieren. Eine verbesserte Benetzung der Membranporen reduziert den hydraulischen Eintrittswiderstand für Wasser und kann somit zu einem erhöhten Wasserfluss führen, selbst wenn foulingbedingte Ablagerungen weiterhin vorhanden sind.

In vielen Fällen wird Fouling durch chemische Reinigung nicht vollständig entfernt, sondern vielmehr in seiner chemischen Struktur verändert. Beispielsweise können Proteine denaturieren und eine fla-

chere Konformation einnehmen oder polymerartige Ablagerungen infolge von Quellung eine geringere hydraulische Widerstandswirkung aufweisen. Diese Effekte führen zu einer Reduktion des Strömungswiderstands, ohne dass die Foulingmasse signifikant abnimmt.

Für eine zuverlässige Bewertung der Reinigungswirkung ist es daher notwendig, den Wasserfluss durch ergänzende Charakterisierungsmethoden zu ergänzen. Dazu zählen beispielsweise die Bestimmung der Rückhaltung charakteristischer Solute, die Analyse der Oberflächenhydrophilie oder der Vergleich mit der ursprünglichen Reinstwasserpermeabilität der Membran.

## 4 Affinitätsmembranen

Die Adsorption gelöster Stoffe an Membranoberflächen ist ein häufig beobachteter Effekt in membranbasierten Trennprozessen. Bei konventionellen Ultrafiltrationsmembranen tritt Adsorption oftmals unspezifisch auf und führt zu unerwünschten Effekten wie Fouling, Fluxabnahme oder Veränderungen des Stoffrückhalts. Diese Wechselwirkungen sind auf die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Membranoberfläche zurückzuführen, insbesondere auf Oberflächenladung, Hydrophilie sowie das Vorhandensein spezifischer funktioneller Gruppen.

Gleichzeitig zeigen diese Effekte, dass Membranoberflächen grundsätzlich in der Lage sind, gelöste Stoffe selektiv zu binden. Dieses Erkenntnis bildet die Grundlage für das Konzept der Affinitätsmembranen. Im Gegensatz zu konventionellen Membranen werden bei Affinitätsmembranen gezielt definierte Bindungsstellen in die Membran integriert oder an deren Oberfläche immobilisiert. Dadurch wird Adsorption von einem unspezifischen, oft unerwünschten Nebeneffekt zu einem kontrollierten und selektiven Trennmechanismus weiterentwickelt. Affinitätsmembranen nutzen somit adsorptive Wechselwirkungen gezielt, um bestimmte Zielstoffe mit hoher Selektivität zurückzuhalten oder anzureichern.

Affinitäts-Ultrafiltration stellt eine Erweiterung der klassischen Ultrafiltration dar, bei der neben Grösenausschlusseffekten gezielte Wechselwirkungen zwischen Membran und gelösten Stoffen genutzt werden.

Während bei konventionellen Ultrafiltrationsprozessen die Trennung primär durch die Porengrösse der Membran bestimmt wird, beruht die Affinitäts-Ultrafiltration zusätzlich auf spezifischen Bindungsmechanismen. Diese Bindungen entstehen durch definierte Andockstellen (engl. *binding sites*) auf oder in der Membranmatrix.

Solche Andockstellen können funktionelle Gruppen, immobilisierte Liganden oder biochemisch aktive Moleküle sein. Ziel ist es, bestimmte Stoffe selektiv zurückzuhalten oder anzureichern. Die Trennleistung der Affinitäts-Ultrafiltration hängt somit nicht ausschliesslich von physikalischen Membraneigenschaften ab. Vielmehr spielen chemische und biochemische Wechselwirkungen eine zentrale Rolle. Die selektive Bindung ermöglicht eine erhöhte Trennschärfe gegenüber strukturell ähnlichen Stoffen. Insbesondere in komplexen Flüssigkeiten bietet dieses Verfahren entscheidende Vorteile.

Affinitäts-Ultrafiltration findet daher Anwendung in der Bio- und Verfahrenstechnik. Typische Einsatzgebiete sind die Aufreinigung von Proteinen, Enzymen und Biomolekülen. Auch in der pharmazeutischen und medizinischen Forschung gewinnt das Verfahren zunehmend an Bedeutung.

Die Bindung zwischen Zielstoff und Membran ist in der Regel reversibel ausgelegt. Dadurch kann der gebundene Stoff gezielt wieder freigesetzt werden. Dies erfolgt beispielsweise durch Änderung des pH-Werts oder der Ionenstärke. Der Prozess erlaubt somit nicht nur die Abtrennung, sondern auch die kontrollierte Rückgewinnung der Zielsubstanz. Gleichzeitig stellt die gezielte Oberflächenfunktionalisierung hohe Anforderungen an die Membranherstellung. Stabilität und Reproduzierbarkeit der

Bindungsstellen sind dabei von grosser Bedeutung. Zudem müssen unspezifische Adsorptionseffekte minimiert werden.

Insgesamt kombiniert die Affinitäts-Ultrafiltration membranbasierte Trennung mit molekularer Selektivität.

Kommerzielle Hersteller und Anbieter:

- **Sartorius** Sartorius bietet ein breites Portfolio an membranbasierten Trenn- und Aufreinigungslösungen, darunter funktionalisierte Chromatographiemembranen (z. B. Sartobind®) für Protein- und Biomolekülpurifikation sowie membrane adsorber und UF-Module für biotechnologische Anwendungen. :contentReference[oaicite:0]index=0
- **Merck Millipore** Merck Millipore (Teil der Merck Gruppe) ist ein führender Anbieter von Filtrations- und Aufreinigungstechnologien und liefert unter anderem Membranen und membrane adsorber zur Bioprozesstechnologie, affinitäts- und chromatographiegestützten Trennungen sowie Werkzeuge für Proteinpurifikation. :contentReference[oaicite:1]index=1
- **Pall Corporation** Pall Corporation ist ein international tätiger Hersteller von Filtrations-, Trenn- und Reinigungsprodukten. Das Life-Sciences-Portfolio umfasst membrane adsorber, chromatographiemembranen und Filtrationslösungen für biopharmazeutische und analytische Anwendungen. :contentReference[oaicite:2]index=2
- **Cytiva** Cytiva (vormals GE Healthcare Life Sciences) bietet Membran-basierte Chromatographie- und Aufreinigungslösungen an, darunter Membranadsorber und membrane für Protein- und Biomolekülaufreinigungen, sowie vielfältige downstream-Technologien für biotechnologische Prozesse. :contentReference[oaicite:3]index=3

Hersteller	Produktbeispiel	Link
Sartorius	Sartobind® Rapid A (Protein-A-Affinitätsmembranadsorber für die selektive Aufreinigung monoklonaler Antikörper)	<a href="https://www.sartorius.com">https://www.sartorius.com</a>
Merck Millipore	Natrix® Q (Chromatographiemembran mit starken Anionenaustauschgruppen für biotechnologische Anwendungen)	<a href="https://www.merckmillipore.com">https://www.merckmillipore.com</a>
Pall Corporation	Mustang™ Chromatography Membrane Capsules (Membranadsorber für Ionenaustausch- und Polishing-Schritte)	<a href="https://www.pall.com">https://www.pall.com</a>
Cytiva	Mustang Q XT5 Chromatography Membrane (Chromatographiemembran mit quaternären Ammoniumgruppen zur Biomolekülaufreinigung)	<a href="https://www.cytivalifesciences.com">https://www.cytivalifesciences.com</a>

**Tabelle 2.** Beispiele kommerzieller Membranprodukte mit Affinitäts- bzw. chromatographischen Eigenschaften.