



Konzentrationspolarisation

1	Einleitung	2
2	Konzentration	2
2.1	Stoffmengenkonzentration	3
3	Konzentration und Konzentrationsgradient	3
3.1	Konzentrationsgradient	3
4	Konzentrationspolarisation	5
5	Filmmodell und Stofftransport	7
6	Auswirkungen auf die Filtrationsleistung	10
7	Abgrenzung zu Fouling	10
7.1	Einfluss der Querströmung	10
7.2	Umkehrosmose	10
7.3	Nanofiltration	10
7.4	Ultrafiltration	11
7.5	Mikrofiltration	11
7.6	Konsequenzen	12
8	Donnan-Effekt	14
9	Wickelmodule: Spacer	15

1 Einleitung

Konzentrationspolarisation ist ein grundlegendes Phänomen in der Membrantechnik. Sie beschreibt den Einfluss der **Konzentration** zurückgehaltener Stoffe direkt an der Membranoberfläche. Diese Konzentrationszunahme entsteht, weil sich während der Filtration Stoffe, die von der Membran nicht durchgelassen werden, an der Membranoberfläche anreichern. Gleichzeitig strömen die Flüssigkeit sowie jene Stoffe, die die Membran passieren können, durch die Membran hindurch.

Das Phänomen der Konzentrationspolarisation kennen wir aus dem Alltag. An der Kasse im Supermarkt ist die Anzahl der Personen pro Fläche grösser als im übrigen Supermarkt. Der Durchgang bei der Kasse und der Bezahlvorgang wirken wie ein Widerstand: Sie bremsen den Personenstrom Richtung Ausgang. Dadurch sammeln sich vor der Kasse mehr Personen an als in den anderen Bereichen des Supermarkts. Dadurch entsteht ein Unterschied in der Konzentration.

Genauso ist es auch direkt an der Membranoberfläche. Dort ist die Konzentration der zurückgehaltenen Stoffe höher als im übrigen Teil der Lösung.

Dieser Konzentrationsunterschied entsteht nur in einer dünnen Schicht unmittelbar auf der Membran. Obwohl diese Schicht sehr dünn ist, beeinflusst sie den Stofftransport stark und hat damit einen grossen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Filtration.

Für das Verständnis der Konzentrationspolarisation hilft es, sich zuerst den Begriff der Konzentration näher anzuschauen.

2 Konzentration

Die Konzentration gibt an, **wie viel** von einer bestimmten Substanz **in einer bestimmten Menge** eines Stoffes enthalten ist, zum Beispiel pro Liter, pro Kilogramm oder pro Mol.

Merksatz: Konzentration = Menge einer Substanz pro Bezugsgrösse.

Beispiel: 10 g Salz in 1 L Wasser → 10 g/L.

Dabei wird angenommen, dass die betrachtete Substanz homogen verteilt ist.

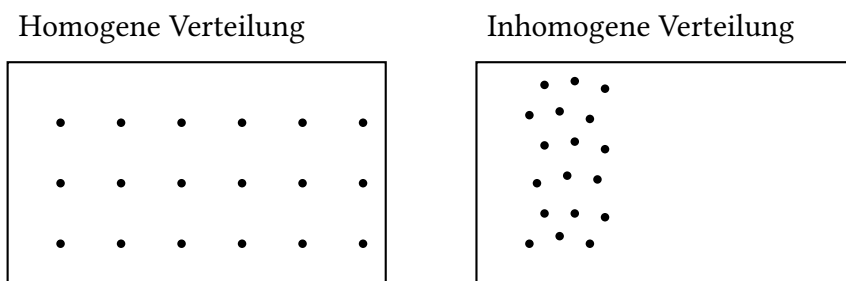


Abbildung 1. Homogene und inhomogene Verteilung

Die Annahme, dass sich gelöste Stoffe immer homogen verteilen, ist korrekt. Der Grund für eine homogene Verteilung ist die **Entropie**. Gemäss dem **zweiten Hauptsatz der Thermodynamik** streben Systeme einen Zustand maximaler Entropie an, was einer möglichst

gleichmässigen Verteilung der Teilchen entspricht. Sind Stoffe in einem System nicht homogen verteilt, so müssen dafür Ursachen oder Kräfte vorhanden sein. In Lösungen liegt eine solche Ursache häufig in der Existenz von Barrieren oder Grenzflächen, beispielsweise Membranen, die den freien Stofftransport einschränken. Auch äussere Felder (Magnetfelder, Gravitationsfelder), Reaktionen oder aktive Transportmechanismen können eine inhomogene Verteilung aufrechterhalten.

2.1 Stoffmengenkonzentration

In der Chemie ist die gebräuchlichste Form die Stoffmengenkonzentration:

$$c = \frac{n}{V}$$

mit

c : Stoffmengenkonzentration (mol L^{-1})

n : Stoffmenge (mol)

V : Volumen der Lösung (L)

Weitere Konzentrationsmasse sind **Massenkonzentration**, **Molbruch** oder **Massenanteil**.

3 Konzentration und Konzentrationsgradient

In der Membrantechnik ist die Konzentration wichtig, weil sie den Stofftransport durch die Membran direkt beeinflusst. Bei druckgetriebenen Membranprozessen wird auf der Feed- bzw. Retentatseite ein Druck angelegt. Dieser Druck ist die treibende Kraft, welche die Lösung durch die Membran bewegt.

Das Lösungsmittel (meist Wasser) kann die Membran relativ leicht passieren. Gelöste Stoffe werden dagegen durch die Eigenschaften der Membran zurückgehalten oder nur teilweise transportiert.

Dadurch entstehen unterschiedliche Konzentrationen auf der Retentatseite und auf der Permeatseite.

Der Konzentrationsunterschied besteht jedoch nicht nur zwischen Retentat und Permeat. Auch innerhalb der Retentatseite nimmt die Konzentration zu, je näher man sich der Membran annähert.

3.1 Konzentrationsgradient

Die Änderung der Konzentration innerhalb eines Raumes oder Räumen die miteinander in Verbindung sind bezeichnet man als Konzentrationsgradient. Man kann sich einen Gradient wie eine **Steigung** vorstellen:

- Auf einem steilen Hügel ändert sich die Höhe schnell – der Höhengradient ist gross.
- Auf einer flachen Ebene ändert sich die Höhe kaum – der Höhengradient ist klein .

Genauso beschreibt der Konzentrationsgradient, wie stark sich die Konzentration im Raum verändert, zum Beispiel in Richtung der Membran.

In eindimensionaler Betrachtung, beispielsweise senkrecht zur Membranoberfläche, ist der Konzentrationsgradient der Komponente i definiert als

$$\frac{dc_i}{dx} \quad (1)$$

wobei x die Ortskoordinate senkrecht zur Transportrichtung ist. Ein nicht verschwindender Konzentrationsgradient bedeutet, dass in dem betrachteten System ein Ungleichgewicht vorliegt.

Obiger Ausdruck ist eine Ableitung aus der Mathematik. Er beschreibt, wie sich die Konzentration c_i einer Komponente ändert, wenn man sich räumlich in x -Richtung bewegt.

Das Symbol d steht für eine sehr kleine Änderung. dx bezeichnet also eine sehr kleine Änderung auf der räumlichen x -Achse x , und dc_i ist die entsprechende sehr kleine Änderung der Konzentration c_i .

Der Quotient dc_i/dx beschreibt daher, wie stark sich die Konzentration räumlich variiert, wenn man sich im raum um ein *sehr kleines Stück* auf der x -Achse bewegt.

Ist dieser Wert gross, ändert sich die Konzentration stark; ist er klein oder null, bleibt die Konzentration nahezu konstant.

Die Schreibweise mit d gehört zur Ableitung. Sie bedeutet, dass die Änderung einer Grösse genau an einem Punkt betrachtet wird und nicht über einen grösseren Abstand gemittelt ist.

Anschaulich kann man sich x als eine Längenkoordinate vorstellen, beispielsweise den Abstand senkrecht zur Membran. Die Konzentration c_i ist dann keine feste Zahl, sondern eine Funktion des Ortes, also $c_i = c_i(x)$.

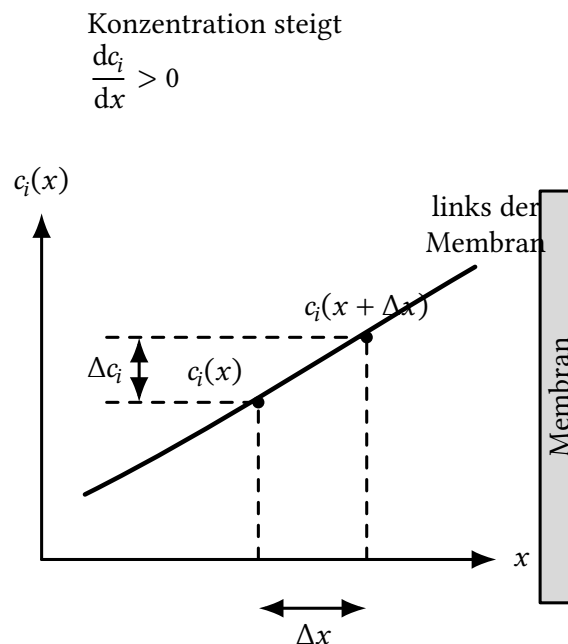


Abbildung 2. Anschauliche Darstellung einer ortsabhängigen Konzentration $c_i(x)$.

Die Ableitung dc_i/dx gibt an, wie gross die Änderung der Konzentration ist, wenn man

sich um eine sehr kleine Strecke dx weiterbewegt. Mathematisch ist sie definiert als der Grenzwert

$$\frac{dc_i}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{c_i(x + \Delta x) - c_i(x)}{\Delta x} \quad (2)$$

Das Ergebnis beschreibt also die Steigung der Konzentration entlang der Raumrichtung x . Ist die Ableitung positiv, nimmt die Konzentration mit zunehmendem Ort x zu. Ist sie negativ, nimmt die Konzentration in dieser Richtung ab. Ist die Ableitung gleich null, so ist die Konzentration räumlich konstant.

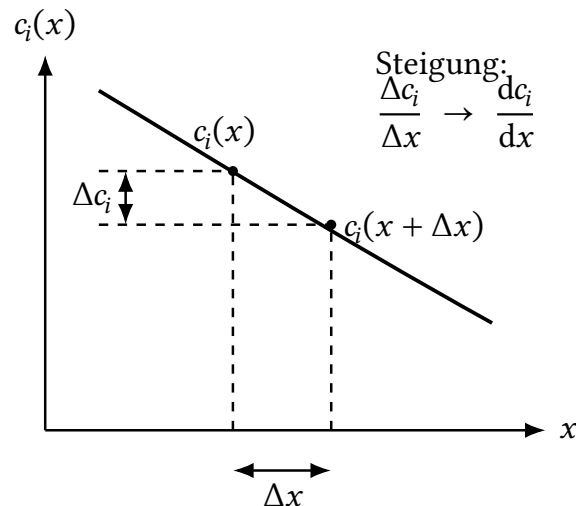


Abbildung 3. Konzentrationsgradient, mathematisch.

4 Konzentrationspolarisation

In druckgetriebenen Membranprozessen wird zwischen der Feed- und der Permeatseite der Membran ein Druckunterschied angelegt. Der höhere Druck auf der Feed-Seite erzeugt einen Volumenstrom, der das Fluid durch die Membran treibt. Dabei wird das Lösungsmittel zusammen mit den permeierenden Komponenten durch die Membran transportiert, während andere gelöste Stoffe aufgrund der selektiven Eigenschaften der Membran zurückgehalten werden.

Dieser Vorgang führt dazu, dass sich zurückgehaltene Komponenten in der Nähe der Membranoberfläche anreichern. Der dadurch entstehende Zustand wird als Konzentrationspolarisation bezeichnet. Der räumliche Unterschied der Konzentration wird durch den Konzentrationsgradienten beschrieben.

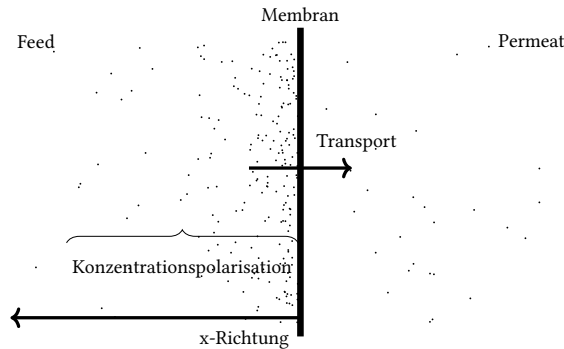


Abbildung 4. In Richtung Membranoberfläche nimmt die Konzentration zu. In einer rel. dünnen Schicht direkt an der Membranoberfläche ist die Konzentration sehr hoch.

In der Membrantechnik ist es üblich, die x -Richtung von der Membranoberfläche weg in die Flüssigkeit hinein zu definieren.

Dabei wird der Ursprung der Koordinate an der Membranoberfläche gewählt, sodass

$$x = 0$$

an der Membran liegt.

Mit dieser Konvention gilt:

$$c_i(x = 0) = c_{i,M}$$

für die Konzentration der Komponente i an der Membranoberfläche und

$$c_i(x \rightarrow \infty) = c_{i,B}$$

für die Konzentration im Bulk der Lösung.

Im Fall der Konzentrationspolarisation ist die Konzentration der zurückgehaltenen Komponente an der Membran höher als im Bulk, das heisst

$$c_{i,M} > c_{i,B}.$$

Daraus folgt, dass der Konzentrationsgradient

$$\frac{dc_i}{dx}$$

negativ ist, da die Konzentration mit zunehmendem Abstand von der Membran abnimmt.

Im Konzentrationsgradienten selbst erscheint kein explizites Minuszeichen. Abhängig vom Verlauf der Konzentration kann dieser Ausdruck positiv oder negativ sein. Bei der hier gewählten Koordinate, bei der x von der Membran weg zunimmt und die Konzentration vom Membranwert zum Bulk abnimmt, gilt

$$\frac{dc_i}{dx} < 0.$$

Das Differential dx bezeichnet eine sehr kleine Änderung der räumlichen Koordinate x , während dc_i die entsprechende sehr kleine Änderung der Konzentration c_i beschreibt.

Die Schreibweise mit d kennzeichnet eine Ableitung.

Für Ableitungen gilt, dass die Änderung der betrachteten Grösse lokal an einem Punkt bestimmt wird und nicht über einen endlichen Abstand gemittelt ist.

Mathematisch ist sie definiert als der Grenzwert

$$\frac{dc_i}{dx} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{c_i(x + \Delta x) - c_i(x)}{\Delta x} \quad (3)$$

Das Ergebnis beschreibt also die Steigung der Konzentration entlang der Raumrichtung x . Ist die Ableitung positiv, nimmt die Konzentration mit zunehmendem Ort x zu. Ist sie negativ, nimmt die Konzentration in dieser Richtung ab. Ist die Ableitung gleich null, so ist die Konzentration räumlich konstant.

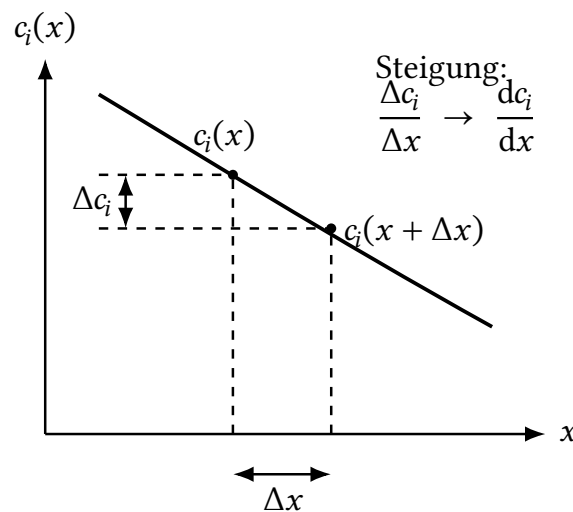


Abbildung 5. Konzentrationsgradient, mathematisch.

5 Filmmodell und Stofftransport

Der Transport von Stoffen zur Oberfläche der Membran erfolgt durch Konvektion, das heisst durch die Strömung. Diese Strömung bringt ständig neue Teilchen zur Membran.

An der Membran kann sich dadurch ein Konzentrationsunterschied bilden, weil dort mehr Teilchen vorhanden sind als im Kernstrom (Bulk).

Sobald ein solcher Konzentrationsunterschied entsteht, beginnt ein Rücktransport. Dieser geschieht durch Diffusion, wobei sich die Teilchen von der Membran weg in Richtung geringerer Konzentration bewegen.

Ein stationärer Zustand ist erreicht, wenn sich diese beiden Stoffströme ausgleichen. Das bedeutet, dass gleich viele Teilchen durch Konvektion zur Membran gelangen, wie durch Diffusion von ihr weg transportiert werden.

Zur Beschreibung dieser Vorgänge wird oft ein einfaches Filmmodell verwendet. Dabei nimmt man an, dass sich direkt vor der Membran eine dünne Grenzschicht mit konstanter Dicke befindet.

Der Transport zur Membran erfolgt durch die Strömung (Konvektion). Der Abtransport setzt sich aus zwei Anteilen zusammen: einem Anteil, der mit dem Permeat durch die Membran transportiert wird, und einem Anteil, der durch Diffusion zurück in den Kernstrom gelangt.

Dieses Gleichgewicht kann mathematisch geschrieben werden als:

$$J_{\text{konv}} = J_{\text{perm}} + J_{\text{diff}}$$

Für eine gelöste Substanz mit der Konzentration c ergibt sich:

$$J_v c = J_v c_p + J_{\text{diff}}$$

Dabei bedeuten:

- J_v : Flux
- c : Konzentration im Kernstrom
- c_p : Konzentration im Permeat
- J_{diff} : diffusiver Rücktransport

Im stationären Zustand bleibt die Konzentrationsverteilung an der Membranoberfläche zeitlich konstant, da sich Zu- und Abtransport der gelösten Stoffe genau ausgleichen.

Wird die Koordinate x von der Membranoberfläche in Richtung Kernstrom definiert, so nimmt die Konzentration $c(x)$ mit zunehmendem Abstand von der Membran ab. Damit gilt in der Grenzschicht:

$$\frac{dc}{dx} < 0.$$

Der diffusive Stofftransport erfolgt stets von hoher zu tiefer Konzentration. In diesem Fall zeigt der Diffusionsfluss daher in positive x -Richtung, also von der Membranoberfläche zurück in den Kernstrom, und kann mit dem Fickschen Gesetz beschrieben werden als:

$$J_{\text{diff}} = -D \frac{dc}{dx}.$$

Im stationären Zustand gilt eine Stoffbilanz an der Membranoberfläche: Der durch Konvektion zur Membran transportierte Stoffstrom muss gleich gross sein wie die Summe aus dem durch die Membran tretenden Stoffstrom und dem diffusen Rücktransport in den Kernstrom. Daraus ergibt sich:

$$Jc = Jc_p + J_{\text{diff}}.$$

Einsetzen des Diffusionsterms liefert:

$$Jc = Jc_p - D \frac{dc}{dx}.$$

Dabei bedeuten:

- J : Volumenstromdichte (Permeatfluss)
- $c(x)$: Konzentration in der Grenzschicht
- c_p : Konzentration im Permeat
- D : Diffusionskoeffizient
- x : Abstand von der Membranoberfläche in Richtung Kernstrom

Für den häufigen Spezialfall einer vollständig rückhaltenden Membran ($c_p \approx 0$) vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$Jc = -D \frac{dc}{dx}.$$

Diese Gleichung beschreibt das Gleichgewicht zwischen konvektivem Transport zur Membran und diffusivem Rücktransport in den Kernstrom und bildet die Grundlage für die Beschreibung der Konzentrationspolarisation.

Mit der Koordinate x von der Membranoberfläche in Richtung Kernstrom gelten die Randbedingungen

$$x = 0 : \quad c(0) = c_m$$

$$x = \delta : \quad c(\delta) = c_b,$$

wobei δ die Dicke der Grenzschicht ist, c_m die Konzentration direkt an der Membranoberfläche und c_b die Konzentration im Kernstrom (Bulk).

Aus der stationären Bilanz

$$Jc = Jc_p - D \frac{dc}{dx}$$

folgt die Differentialgleichung

$$\frac{dc}{dx} = \frac{J}{D} (c_p - c).$$

Lösen mit $c(0) = c_m$ ergibt das Konzentrationsprofil

$$c(x) = c_p - (c_p - c_m) \exp\left(\frac{J}{D} x\right).$$

Mit der zweiten Randbedingung $c(\delta) = c_b$ erhält man den Zusammenhang zwischen Membranoberflächen- und Bulk-Konzentration:

$$c_b = c_p - (c_p - c_m) \exp\left(\frac{J}{D} \delta\right),$$

also

$$c_m = c_p - (c_p - c_b) \exp\left(-\frac{J}{D} \delta\right).$$

Spezialfall: vollständige Rückhaltung ($c_p \approx 0$)

$$c(x) = c_m \exp\left(-\frac{J}{D} x\right)$$

und für die Konzentration an der Membranoberfläche:

$$c_m = c_b \exp\left(\frac{J}{D} \delta\right).$$

Das Verhältnis aus Diffusionskoeffizient D und der Dicke der Grenzschicht δ wird als Stoffübergangskoeffizient bezeichnet:

$$k = \frac{D}{\delta}.$$

Der Stoffübergangskoeffizient k beschreibt, wie gut gelöste Stoffe durch Diffusion aus der Grenzschicht zurück in den Kernstrom transportiert werden können. Ein grosser Wert von k bedeutet einen effizienten Stoffaustausch, ein kleiner Wert einen schlechten Abtransport.

Das Verhältnis

$$\frac{c_m}{c_b}$$

wird als Konzentrationspolarisationsmodul bezeichnet. Es gibt an, wie stark die Konzentration direkt an der Membranoberfläche c_m im Vergleich zur Konzentration im Kernstrom c_b erhöht ist.

Dieses Verhältnis nimmt zu,

- wenn der Fluss J zunimmt, da mehr Stoff zur Membran transportiert wird,
- wenn die Rückhaltung der Membran zunimmt, da mehr Stoff an der Membran verbleibt,
- wenn der Stoffübergangskoeffizient k abnimmt, da der Rücktransport durch Diffusion schlechter wird.

Wird der gelöste Stoff vollständig von der Membran zurückgehalten ($R = 1$ und $c_p = 0$), vereinfacht sich der Zusammenhang zu:

$$\frac{c_m}{c_b} = \exp\left(\frac{J}{k}\right).$$

Aus dieser Gleichung wird deutlich, dass die Konzentrationspolarisation im Wesentlichen durch zwei Größen bestimmt wird: den Permeatfluss J und den Stoffübergangskoeffizienten k . Ein hoher Fluss verstärkt die Konzentrationspolarisation, während ein hoher Stoffübergang sie verringert.

Mit steigendem Permeatfluss nimmt die Oberflächenkonzentration exponentiell zu. Dieser Zusammenhang verdeutlicht die starke Kopplung zwischen Hydrodynamik und Stofftransport.

6 Auswirkungen auf die Filtrationsleistung

Die Konzentrationspolarisation beeinflusst die effektive Trennleistung der Membran. Sie kann zu einer scheinbaren Änderung der Membranpermeabilität führen. In einigen Fällen wird eine scheinbare Verringerung der Permeabilität beobachtet. Dies ist auf den zusätzlichen Diffusionswiderstand zurückzuführen. Gleichzeitig erhöht sich der hydraulische Widerstand in der Grenzschicht. Der Gesamtwiderstand des Systems nimmt dadurch zu. Der Permeatfluss sinkt bei konstantem transmembranem Druck. In anderen Fällen kann eine scheinbare Erhöhung der Rückhalterate auftreten. Diese ist jedoch nicht auf die Membran selbst zurückzuführen. Vielmehr wirkt die Konzentrationspolarisation wie eine zusätzliche Trennschicht.

7 Abgrenzung zu Fouling

Die Konzentrationspolarisation ist von Membranfouling zu unterscheiden. Sie ist grundsätzlich reversibel. Wird der Permeatfluss reduziert oder gestoppt, baut sich der Konzentrationsgradient ab. Fouling hingegen ist häufig irreversibel oder nur teilweise reversibel. Allerdings kann Konzentrationspolarisation als Vorstufe von Fouling wirken. Hohe Oberflächenkonzentrationen begünstigen die Aggregation von Partikeln. Dies kann zur Bildung

einer Deckschicht führen. In diesem Fall geht die Konzentrationspolarisation in Fouling über. Die Prozessführung entscheidet über diesen Übergang.

7.1 Einfluss der Querströmung

Eine effektive Massnahme zur Reduktion der Konzentrationspolarisation ist die Erhöhung der Querströmungsgeschwindigkeit. Höhere Scherraten an der Membranoberfläche führen zu einer Ausdünnung der Grenzschicht. Der Stoffübergangskoeffizient steigt mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit. Dadurch wird der Rücktransport angereicherter Komponenten in den Bulk verbessert. Die Oberflächenkonzentration sinkt. Der zusätzliche Diffusionswiderstand wird reduziert. Diese Massnahme ist besonders in Crossflow-Systemen wirksam. Sie ist jedoch mit einem erhöhten Energiebedarf verbunden.

7.2 Umkehrosmose

Bei der Umkehrosmose ist die Membran nahezu dicht. Fast alle gelösten Stoffe, insbesondere Ionen (Salze), werden zurückgehalten, während Wasser die Membran passiert. Dadurch werden die gelösten Stoffe kontinuierlich zur Membran transportiert und können diese nicht durchdringen. Sie reichern sich direkt an der Membranoberfläche an, was zu einer starken Konzentrationspolarisation führt. Die angereicherten Ionen erhöhen lokal den osmotischen Druck an der Membranoberfläche. Dieser osmotische Druck wirkt dem angelegten Betriebsdruck entgegen und reduziert den effektiven treibenden Druck für den Wassertransport. In der Praxis bedeutet das: Der Permeatfluss sinkt, obwohl der Betriebsdruck unverändert bleibt. Auch bei der Umkehrosmose spielen elektrische Effekte eine Rolle. Viele Umkehrosmosemembranen sind geladen, und die zurückgehaltenen Ionen beeinflussen die lokale elektrische Umgebung an der Membranoberfläche. Diese Effekte sind jedoch weniger trennwirksam als bei der Nanofiltration, da die Trennung bei der Umkehrosmose hauptsächlich durch die nahezu vollständige Rückhaltung aller gelösten Stoffe bestimmt wird.

7.3 Nanofiltration

Bei der Nanofiltration werden gelöste organische Moleküle und mehrwertige Ionen teilweise oder vollständig zurückgehalten, während Wasser und einwertige Ionen die Membran bevorzugt passieren. Durch den Druckfluss werden die zurückgehaltenen Stoffe kontinuierlich zur Membran transportiert und können diese nur eingeschränkt passieren. Dadurch reichern sie sich in der Nähe der Membranoberfläche an, und es entsteht eine ausgeprägte Konzentrationspolarisation. Die Konzentrationspolarisation hat bei der Nanofiltration mehrere wesentliche Auswirkungen. Sie erhöht die Konzentration an der Membranoberfläche gegenüber dem Kernstrom, was den effektiven osmotischen Druck an der Membran vergrössert. Dadurch wird der treibende Druck für den Lösungsmitteltransport reduziert, und der Permeatfluss nimmt ab. Zusätzlich kann die erhöhte lokale Konzentration zu Salz- oder organischen Ablagerungen führen und Fouling begünstigen. In der Praxis ist die Konzentrationspolarisation bei der Nanofiltration oft stärker ausgeprägt als bei der Ultrafiltration und deutlich relevanter als bei der Mikrofiltration.

Viele Nanofiltrationsmembranen tragen selbst elektrische Ladungen an ihrer Oberfläche

oder in den Poren, meist negative. Gleichzeitig sind viele gelöste Stoffe in wässrigen Lösungen Ionen, also ebenfalls geladen.

Dadurch wirkt bei der Nanofiltration nicht nur eine Grössentrennung, sondern zusätzlich eine elektrostatische Wechselwirkung. Ionen mit gleicher Ladung wie die Membran werden abgestossen und stärker zurückgehalten, während entgegengesetzt geladene Ionen bevorzugt passieren können. Besonders deutlich ist dieser Effekt bei mehrwertigen Ionen, die stärker elektrisch wechselwirken als einwertige Ionen.

Diese Effekte führen dazu, dass die Rückhaltung in der Nanofiltration stark von der Ladung, der Ionenstärke der Lösung und vom pH-Wert abhängt. Man spricht dabei oft vom sogenannten Donnan-Effekt. Durch Konzentrationspolarisation können sich geladene Teilchen zusätzlich an der Membranoberfläche anreichern, was die lokalen elektrischen Effekte weiter verstärkt.

7.4 Ultrafiltration

Bei der Ultrafiltration werden Makromoleküle wie Proteine, Polymere oder Kolloide von der Membran zurückgehalten, während Lösungsmittel und kleine Moleküle die Membran passieren können. Durch den konvektiven Transport zur Membran werden die zurückgehaltenen Stoffe in Richtung Membranoberfläche mitgeführt und können diese nicht passieren. Dadurch reichern sie sich direkt an der Membranoberfläche an, und es bildet sich eine erhöhte Konzentration in der Grenzschicht vor der Membran. Diese Anreicherung ist ein typisches Beispiel für Konzentrationspolarisation. Die Konzentrationspolarisation hat bei der Ultrafiltration mehrere wichtige Folgen. Zum einen verringert sie den effektiven treibenden Konzentrations- oder Druckunterschied, wodurch der Permeatfluss abnimmt. Zum anderen kann die erhöhte Konzentration an der Membranoberfläche zur Gel- oder Deckschichtbildung führen. Diese Schicht wirkt als zusätzlicher Widerstand und kann den Fluss weiter reduzieren oder sogar dominieren. In der Praxis bestimmt die Konzentrationspolarisation bei der Ultrafiltration oft den erreichbaren Fluss und die Prozessstabilität.

7.5 Mikrofiltration

Auch bei der Mikrofiltration tritt Konzentrationspolarisation auf. Teilchen, die grösser sind als die Poren der Membran, werden zurückgehalten und können sich in der Nähe der Membranoberfläche anreichern. Damit entsteht grundsätzlich derselbe Effekt wie bei anderen Membranprozessen.

Im Vergleich zu Ultrafiltration, Nanofiltration oder Umkehrosiose ist die Konzentrationspolarisation bei der Mikrofiltration jedoch weniger ausgeprägt. Der Grund dafür ist, dass die Poren der Mikrofiltrationsmembranen relativ gross sind und viele gelöste Stoffe ungehindert hindurchtreten. Zudem sind die Flüsse oft geringer und die zurückgehaltenen Teilchen meist Partikel oder Zellen, die durch Strömung und Scherkräfte leichter wieder abtransportiert werden. In der Praxis spielt bei der Mikrofiltration daher häufig nicht die Konzentrationspolarisation, sondern eher die Bildung eines Filterkuchens oder einer Deckschicht auf der Membran die entscheidende Rolle. Diese Schicht wirkt wie ein zusätzlicher Widerstand und beeinflusst den Fluss oft stärker als die eigentliche Konzentrationspolarisation.

7.6 Konsequenzen

Die Folgen der Konzentrationspolarisation lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Durch die erhöhte Konzentration an der Membranoberfläche ($c_m > c_b$) kann die gemessene Rückhaltung kleiner sein als die tatsächliche Rückhaltefähigkeit der Membran. Die beobachtete Rückhaltung wird definiert als:

$$R_{\text{obs}} = 1 - \frac{c_p}{c_b}$$

Die intrinsische Rückhaltung der Membran bezieht sich dagegen auf die Konzentration direkt an der Membranoberfläche und ist definiert als:

$$R_{\text{int}} = 1 - \frac{c_p}{c_m}$$

Da bei Konzentrationspolarisation gilt $c_m > c_b$, folgt daraus:

$$R_{\text{obs}} < R_{\text{int}}$$

Das bedeutet, dass die Membran besser trennt, als es anhand der gemessenen Konzentrationen im Bulk und im Permeat erscheint. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt bei niedermolekularen gelösten Stoffen wie Salzen, bei denen die Konzentrationspolarisation im Vergleich zum Trenneffekt der Membran eine wichtige Rolle spielt.

Die Rückhaltung kann durch Konzentrationspolarisation auch zunehmen:

Werden makromolekulare Stoffe von der Membran zurückgehalten, können sich diese Stoffe an der Membranoberfläche anreichern und eine zusätzliche Schicht bilden. Diese Schicht wird häufig als sekundäre Membran oder Deckschicht bezeichnet.

Die sekundäre Membran wirkt als zusätzlicher Widerstand für den Stofftransport. Dadurch kann die Rückhaltung anderer, gleichzeitig vorhandener gelöster Stoffe erhöht werden, selbst wenn diese von der eigentlichen Membran nur schwach zurückgehalten würden.

In diesem Fall führt die Konzentrationspolarisation nicht zu einer scheinbar schlechteren, sondern zu einer höheren gemessenen Rückhaltung, da die zusätzliche Schicht die Trennung verstärkt.

Die Werte des Stoffübergangskoeffizienten k , der über die Dicke der Grenzschicht mit dem Diffusionskoeffizienten verknüpft ist, hängen von verschiedenen Faktoren ab. Dazu gehören insbesondere das Strömungsregime (laminar oder turbulent), die Geometrie des Moduls sowie die Eigenschaften des Fluids.

Zur Abschätzung des Stoffübergangs werden häufig empirische Zusammenhänge verwendet, die den Sherwood-Zahl Sh mit der Reynolds-Zahl Re verknüpfen. Die Sherwood-Zahl ist eine dimensionslose Kenngröße für den Stoffübergang und ist definiert als:

$$Sh = \frac{k d}{D}$$

wobei d eine charakteristische Länge (z. B. der Rohrdurchmesser) ist.

Für turbulente Strömung in einem kreisförmigen Rohr kann der Stoffübergang mit folgender empirischer Beziehung beschrieben werden:

$$Sh = 0.023 Re^{0.83} Sc^{0.33}$$

Dabei bedeuten:

Re : Reynolds-Zahl (Strömungszustand)

Sc : Schmidt-Zahl $\left(Sc = \frac{\nu}{D} \right)$

D : Diffusionskoeffizient

ν : kinematische Viskosität

Mit Hilfe solcher Beziehungen kann der Stoffübergangskoeffizient k abgeschätzt werden. Ein turbulentes Strömungsregime führt in der Regel zu höheren Werten von k und damit zu einer geringeren Konzentrationspolarisation.

Es ist zu beachten, dass sich diese Betrachtungen auf lokale Strömungsbedingungen beziehen. Die beschriebenen Zusammenhänge gelten also jeweils für einen kleinen Bereich an der Membranoberfläche.

In der Praxis werden Membranen jedoch nicht einzeln eingesetzt, sondern in Modulen zusammengefasst. Mehrere Membranmodule werden wiederum zu kompletten Membransystemen kombiniert. Dadurch können sich entlang eines Moduls oder innerhalb eines Systems die Strömungsbedingungen, Konzentrationen und Flüsse ändern, sodass die Konzentrationspolarisation nicht überall gleich stark ausgeprägt ist.

Trotzdem sind diese Modelle und Überlegungen sehr hilfreich, um sich ein Bild davon zu machen, was direkt an der Membranoberfläche passiert. Sie ermöglichen ein grundlegendes Verständnis der ablaufenden Transportprozesse.

Auch wenn die Realität in einem Membranmodul komplexer ist, liefern die Modelle wertvolle Anhaltspunkte zur Interpretation praktischer Ergebnisse. Sie helfen insbesondere dabei, beobachtete Effekte im Betrieb besser zu verstehen und plausible Erklärungen für experimentelle Resultate zu finden.

Der Stofftransport über die Grenzschicht wird durch die Sherwood-Zahl beschrieben:

$$Sh = \frac{k d_h}{D} \quad (4)$$

Hierbei ist k der Stoffübergangskoeffizient und D der Diffusionskoeffizient der betrachteten Substanz. Die Sherwood-Zahl ist somit ein Mass für die Effizienz des Stofftransports relativ zur molekularen Diffusion. Sie verknüpft hydrodynamische Bedingungen direkt mit der Konzentrationspolarisation.

Für viele Modulgeometrien existieren empirische Korrelationen zwischen Sherwood-, Reynolds- und Schmidt-Zahl. Eine häufig verwendete Form ist:

$$Sh = a Re^b Sc^c \quad (5)$$

Die Exponenten b und c hängen von der Strömungsgeometrie und dem Strömungsregime ab. Die Schmidt-Zahl beschreibt das Verhältnis von Impuls- zu Stofftransport:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} \quad (6)$$

In der Mikrofiltration dominieren partikuläre Stoffe mit sehr niedrigen Diffusionskoeffizienten. Daraus resultieren hohe Schmidt-Zahlen. Die Konzentrationspolarisation ist daher

stark von der hydrodynamischen Durchmischung abhängig. Eine Erhöhung der Reynolds-Zahl führt zu einem deutlichen Anstieg der Sherwood-Zahl. Die Reduktion der Grenzschichtdicke ist in der Mikrofiltration besonders ausgeprägt.

In der Ultrafiltration spielt neben partikulären auch makromolekularer Transport eine Rolle. Die Diffusionskoeffizienten von Proteinen und Polymeren sind höher als die von Partikeln, jedoch deutlich geringer als die von Salzen. Die Konzentrationspolarisation führt hier oft zu einer starken Erhöhung der Oberflächenkonzentration. Dies kann zur Gelbildung oder zur Ausbildung viskoser Grenzschichten führen. Die Kenntnis geeigneter Sherwood-Korrelationen ist für die Prozessauslegung entscheidend.

In der Nanofiltration und Umkehrosmose betrifft die Konzentrationspolarisation vorwiegend niedermolekulare gelöste Stoffe. Hier manifestiert sie sich als Konzentrationsanstieg gelöster Salze an der Membranoberfläche. Dieser Effekt führt zu einer lokalen Erhöhung des osmotischen Drucks. Der effektive treibende Druck über der Membran wird dadurch reduziert. Die Folge ist eine Abnahme des Permeatflusses bei konstantem Betriebsdruck.

In NF- und RO-Prozessen wirkt die Konzentrationspolarisation daher doppelt. Sie erhöht sowohl den Stoffübergangswiderstand als auch den osmotischen Gegendruck. Hohe Reynolds-Zahlen werden eingesetzt, um diesen Effekt zu minimieren. Spacer-Geometrien und modulinterne Strömungslenker erhöhen lokal die Turbulenz. Dadurch steigt die Sherwood-Zahl signifikant an.

Die Übertragbarkeit der Konzepte zwischen MF, UF, NF und RO liegt in der einheitlichen Beschreibung durch dimensionslose Kennzahlen. Reynolds- und Sherwood-Zahlen erlauben eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Membranmodule. Sie stellen ein zentrales Werkzeug der wissenschaftlichen Prozessauslegung dar. Die gezielte Nutzung dieser Kennzahlen ermöglicht eine kontrollierte Reduktion der Konzentrationspolarisation über alle Membranverfahren hinweg. Dies bildet die Grundlage für stabile, skalierbare und energieeffiziente Membranprozesse.

8 Donnan-Effekt

Bei der Nanofiltration sind Stofftransport und Trennverhalten nicht allein durch Grössen- und Diffusionsmechanismen bestimmt. Zusätzlich spielen elektrochemische Effekte eine zentrale Rolle. Der Donnan-Effekt ist dabei ein charakteristisches Merkmal geladener Nanofiltrationsmembranen. Er beschreibt die Verteilung gelöster Ionen zwischen der Membranphase und der angrenzenden Flüssigkeitsphase.

Nanofiltrationsmembranen weisen in der Regel funktionelle Gruppen auf. Diese Gruppen führen zu einer festen Oberflächenladung der Membran. In wässrigen Systemen entsteht dadurch eine elektrostatische Wechselwirkung mit gelösten Ionen. Ionen mit gleicher Ladung wie die Membran werden abgestossen. Gegensinnig geladene Ionen werden bevorzugt in der Membrannähe angereichert. Diese Ladungsseparation führt zu einer Veränderung der lokalen Ionenkonzentrationen.

Die Konzentrationspolarisation verstärkt den Donnan-Effekt in der Grenzschicht. Durch den konvektiven Stofftransport werden Ionen an der Membranoberfläche angereichert. Die resultierende Erhöhung der Ionenstärke beeinflusst das elektrische Doppelschichtpotential. Dadurch verändert sich die effektive Donnan-Potentialdifferenz zwischen Membran und

Lösung. Der elektrochemische Ausschlussmechanismus wird lokal modifiziert.

Infolge der Konzentrationspolarisation steigt die Salzkonzentration an der Membranoberfläche über den Bulk-Wert an. Dies führt zu einer partiellen Abschirmung der Membranladung. Der Donnan-Ausschluss wird dadurch abgeschwächt. Die Salzurückhaltung der Nanofiltrationsmembran nimmt lokal ab. Dieser Effekt ist insbesondere bei hohen Flüssen ausgeprägt.

Gleichzeitig erhöht die lokale Salzkonzentration den osmotischen Druck an der Membranoberfläche. Der effektive transmembrane Druck wird reduziert. Der Permeatfluss sinkt trotz konstantem Betriebsdruck. Die Konzentrationspolarisation wirkt somit sowohl auf den hydraulischen als auch auf den elektrochemischen Transport.

Der gekoppelte Einfluss von Donnan-Effekt und Konzentrationspolarisation führt zu einem stark nichtlinearen Prozessverhalten. Die Rückhaltung mehrwertiger Ionen ist besonders sensitiv gegenüber lokalen Konzentrationsänderungen. Kleine Variationen der hydrodynamischen Bedingungen können grosse Änderungen im Trennverhalten verursachen. Dies erschwert die Vorhersagbarkeit der Filtrationsleistung.

Zur Prozesskontrolle ist eine gezielte Reduktion der Konzentrationspolarisation notwendig. Eine Erhöhung der Querströmungsgeschwindigkeit reduziert die Ionenanreicherung in der Grenzschicht. Damit bleibt die effektive Membranladung wirksam. Spacer und modulinterne Turbulenzförderer unterstützen diesen Effekt. Die Kombination hydrodynamischer Optimierung und elektrochemischem Membranverständnis ist für die Nanofiltration essenziell.

Der enge Zusammenhang zwischen Donnan-Effekt und Konzentrationspolarisation zeigt, dass Nanofiltration nicht als rein mechanisches Trennverfahren betrachtet werden kann. Vielmehr handelt es sich um einen gekoppelten transport- und ladungsabhängigen Prozess. Die Berücksichtigung beider Effekte ist Voraussetzung für eine fundierte wissenschaftlich-technische Auslegung von Nanofiltrationsprozessen.

Probenahmen

Bei Probenahmen zur Prozessentwicklung ist zu beachten, dass die entnommene Probe immer aus dem Kernstrom stammt und damit eine gemittelte Zusammensetzung enthält. Sie repräsentiert also den Bulk der Lösung und nicht die Bedingungen direkt an der Membranoberfläche. Die Konzentration an der Membranfläche kann jedoch deutlich höher sein als im Kernstrom. Genau diese lokale Konzentration ist für den Stofftransport und die Membranleistung entscheidend, lässt sich aber durch eine einfache Probenahme nicht direkt erfassen.

Insgesamt zeigt sich, dass Upscaling in der Membranfiltration kein rein geometrisches Problem ist. Es handelt sich um eine gekoppelte Fragestellung aus Hydrodynamik, Stofftransport und Betriebsstrategie. Die Modullänge und die Anfahrstrategien nehmen dabei eine zentrale Rolle ein. Ein vorsichtiges, konservatives Vorgehen ist daher zwingend erforderlich. Nur unter dieser Voraussetzung kann eine zuverlässige Übertragung von Pilot- auf Industrieanlagen gelingen.

9 Wickelmodule: Spacer

In Wickelmodulen werden Spacer eingesetzt, um den Strömungskanal zwischen den Membranlagen offen zu halten und die Hydrodynamik gezielt zu beeinflussen. Theoretisch sollen Spacer durch die Erzeugung sekundärer Strömungen die Konzentrationspolarisation reduzieren. In der Praxis ist ihre Wirksamkeit jedoch stark vom Strömungsregime abhängig.

Reale Prozesslösungen in der Membranfiltration weisen in Wickelmodulen typischerweise Reynolds-Zahlen grösser als zwei auf. Damit befinden sich diese Systeme zwar oberhalb des rein diffusionsdominierten Bereichs, jedoch meist weiterhin im laminaren oder schwach instationären Strömungsregime. Unter diesen Bedingungen ist die Ausbildung einer ausgeprägten hydrodynamischen Grenzschicht grundsätzlich nicht vermeidbar.

Spacer wirken primär lokal. Sie erzeugen Umlenkungen, Schergradienten und mikroskalige Rezirkulationszonen. In unmittelbarer Nähe der Spacerfilamente kann die Grenzschichtdicke reduziert werden. Zwischen den Filamenten bildet sich jedoch erneut eine Konzentrationsgrenzschicht aus. Der resultierende Effekt ist räumlich inhomogen.

Bei niedrigen Reynolds-Zahlen können Spacer zu einer signifikanten Erhöhung der Sherwood-Zahl führen. Der Stoffübergang wird lokal verbessert, und die Konzentrationspolarisation nimmt ab. Mit zunehmender Reynolds-Zahl nimmt dieser relative Gewinn jedoch ab. Die Basisdurchmischung des Kanals ist bereits vorhanden. Zusätzliche Turbulenz wird nur noch begrenzt erzeugt.

In realen Prozesslösungen mit erhöhter Viskosität verstärkt sich dieser Effekt. Die effektive Reynolds-Zahl sinkt lokal, obwohl der nominelle Wert über zwei liegt. Gleichzeitig steigt die Schmidt-Zahl deutlich an. Die Diffusion bleibt damit der geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Spacer können diesen diffusionslimitierten Transport nur eingeschränkt kompensieren.

Ein weiterer limitierender Faktor ist die axiale Entwicklung entlang der Modullänge. Spacer beeinflussen die Strömung primär quer zur Hauptströmungsrichtung. Die progressive Konzentrationszunahme entlang des Moduls bleibt davon weitgehend unbeeinflusst. Die Konzentrationspolarisation akkumuliert stromabwärts. Der Eintrittsbereich des Moduls bleibt hydraulisch und stofftransporttechnisch am stärksten belastet.

Zudem erhöhen Spacer den hydraulischen Widerstand des Moduls. Der zusätzliche Druckverlust muss durch höhere Pumpenergie kompensiert werden. Dieser Effekt wächst überproportional mit steigender Viskosität und zunehmender Modullänge. Der energetische Mehraufwand steht nicht immer im Verhältnis zur erzielten Reduktion der Konzentrationspolarisation.

In der Nanofiltration und Umkehrosmose kommt ein weiterer Aspekt hinzu. Die lokale Salzkonzentration beeinflusst den osmotischen Druck. Selbst wenn Spacer die Grenzschicht lokal ausdünnen, bleibt der osmotische Gegendruck entlang des Moduls erhöht. Der Nettofluss wird dadurch weiterhin limitiert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Spacer in Wickelmodulen bei realen Lösungen mit Reynolds-Zahlen über zwei nur begrenzt wirksam sind. Sie verbessern die lokale Durchmischung, können jedoch die grundsätzliche Ausbildung der Konzentrationspolarisation nicht verhindern. Ihr Nutzen liegt eher in der Verzögerung als in der Eliminierung des Effekts. Für die Prozessauslegung bedeutet dies, dass Spacer nicht als alleinige Massnah-

me betrachtet werden dürfen. Die Kontrolle der Konzentrationspolarisation erfordert stets eine Kombination aus hydrodynamischer Auslegung, moderaten Flüssen und geeigneten Betriebsstrategien.

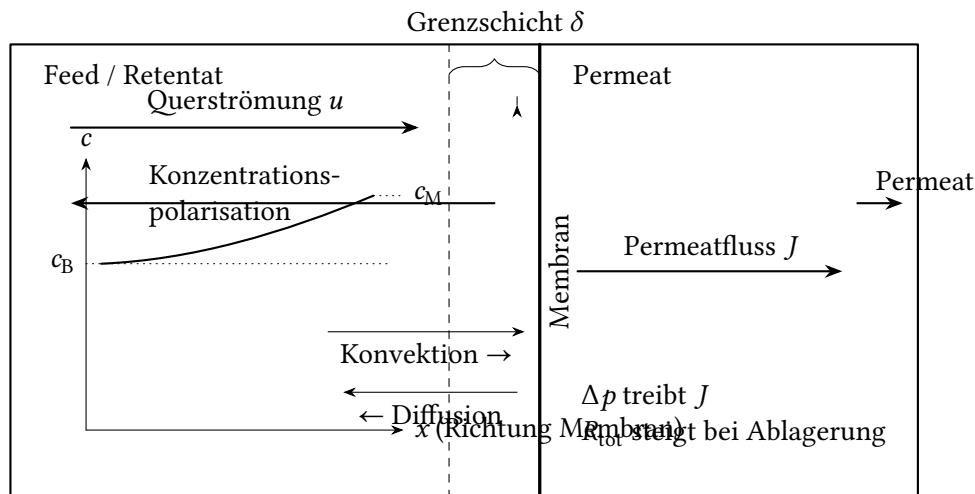


Abbildung 6. Schematische Darstellung der Konzentrationspolarisation: Querströmung im Feed, Permeatfluss durch die Membran, Grenzschicht δ sowie Anstieg der Konzentration von c_B zu c_M an der Membranoberfläche.

Die Grenzschicht wird üblicherweise als dünne, stationäre Schicht modelliert. Innerhalb dieser Schicht ändern sich die Stoffkonzentrationen stark. Im Bulk der Flüssigkeit bleibt die Konzentration näherungsweise konstant. Die Dicke der Grenzschicht ist keine feste Materialeigenschaft. Sie resultiert aus den hydrodynamischen Randbedingungen.

Der Stoffübergangskoeffizient k beschreibt den diffusionsdominierten Rücktransport aus der Grenzschicht. Er ist eine zentrale Größe zur Quantifizierung der Konzentrationspolarisation. Der Massenstrom über die Grenzschicht lässt sich durch Ficksches Gesetz beschreiben:

$$J_{\text{diff}} = -D \frac{dc}{dx} \quad (7)$$

Dabei bezeichnet D den Diffusionskoeffizienten der betrachteten Komponente. x ist die Koordinate senkrecht zur Membranoberfläche. Der negative Gradient kennzeichnet den Rücktransport in Richtung Bulk.

Der konvektive Stoffstrom zur Membran ergibt sich aus:

$$J_{\text{conv}} = J c_M \quad (8)$$

Hierbei ist J der Permeatfluss und c_M die Konzentration an der Membranoberfläche. Im stationären Zustand gilt:

$$J_{\text{conv}} = J_{\text{diff}} \quad (9)$$

Durch Integration über die Grenzschicht ergibt sich das klassische Filmmodell:

$$c_M = c_B \exp\left(\frac{J}{k}\right) \quad (10)$$

c_B bezeichnet die Stoffkonzentration im Bulk. Diese Gleichung zeigt den exponentiellen Zusammenhang zwischen Permeatfluss und Oberflächenkonzentration. Bereits moderate Erhöhungen des Flusses können zu stark erhöhten Oberflächenkonzentrationen führen.

Der Stoffübergangskoeffizient k ist keine konstante Grösse. Er hängt von den hydrodynamischen Bedingungen im Strömungskanal ab. Zur Beschreibung wird häufig die Sherwood-Zahl herangezogen:

$$\text{Sh} = \frac{k d_h}{D} \quad (11)$$

d_h ist der hydraulische Durchmesser des Kanals. Die Sherwood-Zahl stellt eine dimensionslose Beschreibung des Stoffübergangs dar.

Der Zusammenhang zwischen Strömung und Stoffübergang wird über Korrelationen beschrieben:

$$\text{Sh} = a \text{Re}^b \text{Sc}^c \quad (12)$$

Die Reynolds-Zahl beschreibt die Strömungscharakteristik:

$$\text{Re} = \frac{\rho u d_h}{\mu} \quad (13)$$

ρ ist die Dichte der Flüssigkeit. u ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit. μ ist die dynamische Viskosität.

Die Schmidt-Zahl beschreibt das Verhältnis von Impuls- zu Stofftransport:

$$\text{Sc} = \frac{\mu}{\rho D} \quad (14)$$

Hohe Viskositäten führen zu hohen Schmidt-Zahlen. Dies ist typisch für polymerhaltige Lösungen und biotechnologische Medien. In solchen Systemen ist der Stofftransport stark diffusionslimitiert.

Die Viskosität beeinflusst die Konzentrationspolarisation auf mehreren Ebenen. Mit steigender Viskosität nimmt die Reynolds-Zahl ab. Die Strömung wird stabiler und weniger durchmischt. Die Grenzschichtdicke nimmt zu. Gleichzeitig sinkt der Diffusionskoeffizient. Beide Effekte verstärken die Konzentrationspolarisation.

Die erhöhte Oberflächenkonzentration kann zu einer lokalen Viskositätssteigerung führen. Dieser Effekt ist insbesondere bei Makromolekülen relevant. Die Viskosität in der Grenzschicht ist dann höher als im Bulk. Der Stoffübergangskoeffizient sinkt weiter ab. Es entsteht eine positive Rückkopplung.

In der Ultrafiltration kann die Oberflächenkonzentration die Gelkonzentration erreichen. Ab diesem Punkt bildet sich eine viskose Gelschicht. Der Permeatfluss wird flussunabhängig begrenzt. Es ergibt sich der sogenannte Gel-Flux:

$$J_{\text{gel}} = k \ln \left(\frac{c_{\text{gel}}}{c_B} \right) \quad (15)$$

c_{gel} bezeichnet die Gelkonzentration.

In der Nanofiltration und Umkehrosmose beeinflusst die Konzentrationspolarisation zusätzlich den osmotischen Druck. Der lokale osmotische Druck steigt mit zunehmender Oberflächenkonzentration. Der effektive transmembrane Druck reduziert sich:

$$\Delta p_{\text{eff}} = \Delta p - \Delta \pi \quad (16)$$

$\Delta\pi$ ist die osmotische Druckdifferenz.

Der Permeatfluss lässt sich dann schreiben als:

$$J = A(\Delta p - \Delta\pi) \quad (17)$$

A ist die hydraulische Permeabilität der Membran. Die Konzentrationspolarisation wirkt somit direkt flusslimitierend.

Die wissenschaftliche Beschreibung zeigt, dass Konzentrationspolarisation ein gekoppeltes Transportphänomen ist. Hydrodynamik, Stoffdiffusion und Viskosität sind untrennbar miteinander verknüpft. Eine Veränderung einer Grösse beeinflusst alle anderen. Die exakte Vorhersage erfordert daher umfassende Modelle. Vereinfachte Ansätze liefern jedoch wertvolle qualitative Einsichten.

Zusammenfassend ist die Konzentrationspolarisation keine sekundäre Nebenerscheinung. Sie ist eine intrinsische Eigenschaft druckgetriebener Membranprozesse. Der Stoffübergangskoeffizient stellt die zentrale Stellgrösse dar. Die Viskosität wirkt als verstärkender Faktor. Das Verständnis dieser Zusammenhänge ist Voraussetzung für eine fundierte Prozessauslegung.