

# Rohrmembranen

Alain Messinger

## Einleitung

Die druckgetriebene Membrantechnik hat sich in den letzten Jahrzehnten als zentrale Trenntechnologie der Verfahrenstechnik etabliert. Sie ermöglicht die energieeffiziente und selektive Abtrennung von Stoffen aus Flüssigkeits- und Gasgemischen und findet breite Anwendung in der Wasseraufbereitung, in der Lebensmittelindustrie sowie in der chemischen und pharmazeutischen Produktion.

Innerhalb dieser Technologien stellen Rohrmembranen eine spezifische Bauform dar, die sich insbesondere für anspruchsvolle Einsatzbedingungen eignet. Im Gegensatz zu planaren oder spiralgewickelten Modulen zeichnen sich Rohrmembranen durch ihre robuste Geometrie und ihre hohe Toleranz gegenüber belasteten, viskosen oder feststoffhaltigen Medien aus. Sie sind deshalb besonders geeignet für Anwendungen, bei denen Fouling, hohe Partikelkonzentrationen oder nichtnewtonsche Fluide eine wesentliche Rolle spielen.

Ein charakteristisches Merkmal von Rohrmembranen ist ihr vergleichsweise grosser Strömungsquerschnitt, der hohe Schubspannungen an der Membranoberfläche ermöglicht. Dadurch kann die Ablagerung von Partikeln reduziert und ein stabilerer Betrieb erreicht werden. Gleichzeitig erlaubt die modulare Bauweise eine flexible Anpassung an unterschiedliche Prozessanforderungen, wobei im Vergleich zu kompakteren Membranmodulen in der Regel höhere Investitions- und Betriebskosten in Kauf genommen werden müssen.

Im Zentrum der vorliegenden Betrachtung stehen die spezifischen Eigenschaften von Rohrmembranen, insbesondere ihr strömungstechnisches Verhalten, ihre Foulingresistenz sowie ihre Eignung für komplexe, mehrphasige Systeme. Ziel ist es, die charakteristischen Vorteile und Einschränkungen dieser Membranbauform im Kontext druckgetriebener Trennverfahren herauszuarbeiten.

## Markt

Der Markt für Rohrmembranen umfasst polymere und keramische Rohrmembranmodule, die in Mikrofiltrations- (MF), Ultrafiltrations- (UF), Nanofiltrations- (NF) und Umkehrosmose- (RO) Anwendungen eingesetzt werden. Er stellt ein spezialisiertes Segment innerhalb der Mem-

brantrenntechnik dar und ist durch vergleichsweise geringe Stückzahlen bei gleichzeitig hohen Anforderungen an Robustheit und Betriebsstabilität gekennzeichnet.

Rohrmembranen werden vor allem in Anwendungen mit hohen Feststofffrachten, viskosen Medien oder ausgeprägter Foulingneigung eingesetzt, bei denen konventionelle Flachmembran- oder Hohlfasernsysteme an ihre Grenzen stossen. Typische Einsatzgebiete umfassen die industrielle Abwasserbehandlung, die Lebensmittel- und Getränkeverarbeitung sowie biotechnologische Prozesse.

Das Marktumfeld ist durch eine begrenzte Zahl globaler Anbieter sowie durch zahlreiche spezialisierte Hersteller geprägt. Während polymere Rohrmembranen insbesondere durch ihre günstige Kostenstruktur und ihre Flexibilität überzeugen, bieten keramische Systeme Vorteile hinsichtlich chemischer, thermischer und mechanischer Beständigkeit. Sie sind daher für anspruchsvolle Betriebsbedingungen besonders geeignet.

Insgesamt zeigt der Markt eine moderate Wachstumsdynamik, die durch steigende Anforderungen an Wasseraufbereitung, Ressourceneffizienz und Prozesssicherheit getrieben wird. Aufgrund höherer Investitionskosten und spezifischer Einsatznischen bleibt er jedoch klar von volumenstärkeren Membransegmenten wie Hohlfasernmodulen abgegrenzt.

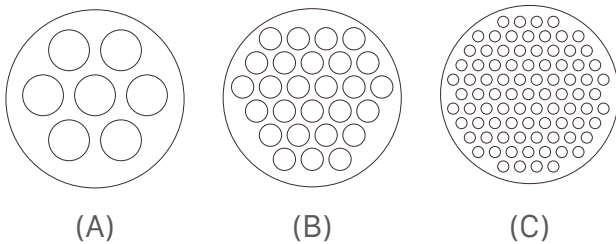
## Klassifikation

Rohrförmige Membranen lassen sich anhand ihrer Geometrie und ihres charakteristischen Durchmessers in verschiedene Bauformen einteilen. Eine gebräuchliche Klassifikation unterscheidet zwischen Rohrmembranen, Röhrchenmembranen, Kapillarmembranen und Hohlfasermembranen.

- **Rohrmembranen:** Rohrmembranen (*tubular membranes*) besitzen vergleichsweise grosse Durchmesser im Bereich von mehreren Millimetern bis zu einigen Zentimetern. Sie sind mechanisch robust und eignen sich insbesondere für Medien mit hoher Feststoffbeladung oder hoher Viskosität. Aufgrund der grossen Strömungsquerschnitte können hohe Schubspannungen an der Membranoberfläche realisiert werden, wodurch Ablagerungen

reduziert und Foulingeffekte abgeschwächt werden.

- **Kapillarmembranen:** Kapillarmembranen (*capillary membranes*) besitzen typische Durchmesser im Bereich von etwa 0,5 mm bis 5 mm. Sie ermöglichen hohe Packungsdichten und damit grosse Membranflächen pro Volumen, sind jedoch empfindlicher gegenüber Fouling und Verblockung.
- **Hohlfasermembranen:** Hohlfasermembranen (*hollow fiber membranes*) weisen typische Durchmesser im Bereich von etwa 0,1 mm bis 3 mm auf. Sie bieten die höchste spezifische Oberfläche, sind jedoch besonders anfällig gegenüber Verschmutzung und stellen erhöhte Anforderungen an die Vorbehandlung des Feedstroms.



**Figure 1.** Schematische Darstellung verschiedener Membrantypen: (A) Rohrmembranen, (B) Kapillarmembranen und (C) Hohlfasermembranen; jeweils mit Querschnitten von Modul und Membran zur Veranschaulichung.

Membranbauform	Typische Durchmesser
Rohrmembranen	5–25 mm
Kapillarmembranen	ca. 0.5–5 mm
Hohlfasermembranen	ca. 0.1–3 mm

**Table 1.** Typische Durchmesserbereiche verschiedener Membranbauformen

Die angegebenen Werte sind als Richtbereiche zu verstehen und können in Abhängigkeit von Anwendung, Material und Hersteller variieren. Mit abnehmendem Durchmesser steigt die Packungsdichte, während zugleich die Anfälligkeit gegenüber Verblockung zunimmt.

## Kapillar- und Hohlfasermembranen

Kapillarmembranen und Hohlfasermembranen gehören beide zur Gruppe der rohrförmigen Membranen und weisen grundsätzlich einen ähnlichen Aufbau auf. Der wesentliche Unterschied liegt jedoch in ihrem charakteristischen Durchmesser sowie in den daraus resultierenden mechanischen und betrieblichen Eigenschaften.

Kapillarmembranen besitzen typischerweise Durchmesser im Bereich von etwa 0,1 mm bis 1 mm. Aufgrund ihrer vergleichsweise grösseren Dimensionen sind sie mecha-

nisch stabiler und weniger anfällig gegenüber Verblockung und Fouling. Zudem erlauben sie höhere Strömungsgeschwindigkeiten und Schubspannungen, was die Reinigung erleichtert und zu einer robusteren Betriebsweise führt.

Hohlfasermembranen hingegen weisen deutlich kleinere Durchmesser im Bereich von etwa 0,05 mm bis 0,5 mm oder darunter auf. Dadurch erreichen sie sehr hohe Packungsdichten und ermöglichen grosse Membranflächen auf kleinem Raum. Diese Eigenschaft macht sie besonders effizient für Anwendungen mit sauberen Medien. Gleichzeitig sind sie jedoch empfindlicher gegenüber Partikeln, Fouling und mechanischer Belastung.

## Flächenberechnung bei Hohlfaser- und Kapillarmodulen

Bei Hohlfaser- und Kapillarmodulen ergibt sich die gesamte Membranfläche aus der Oberfläche der einzelnen Faser beziehungsweise Kapillare multipliziert mit der Anzahl  $n$ . Je nachdem, ob die wirksame Membranfläche auf der Innen- oder auf der Aussenseite definiert wird, ist mit dem Innen- oder mit dem Aussendurchmesser zu rechnen.

Die Innenfläche einer einzelnen Faser oder Kapillare beträgt

$$A_{i,1} = \pi \cdot d_i \cdot L \quad (1)$$

und die Aussenfläche einer einzelnen Faser oder Kapillare

$$A_{a,1} = \pi \cdot d_a \cdot L \quad (2)$$

Für ein Modul mit  $n$  Fasern oder Kapillaren folgt daraus die gesamte innere Membranfläche zu

$$A_i = n \cdot \pi \cdot d_i \cdot L \quad (3)$$

sowie die gesamte äussere Membranfläche zu

$$A_a = n \cdot \pi \cdot d_a \cdot L \quad (4)$$

Dabei gilt

$$d_i = \text{Innendurchmesser} \quad (5)$$

$$d_a = \text{Aussendurchmesser} \quad (6)$$

$$L = \text{Länge des Moduls bzw. der einzelnen Faser} \quad (7)$$

$$n = \text{Anzahl der Fasern oder Kapillaren} \quad (8)$$

Erfolgt die Trennung über die Innenseite, so ist die relevante Membranfläche

$$A_M = A_i = n \cdot \pi \cdot d_i \cdot L \quad (9)$$

Erfolgt die Trennung über die Aussenseite, so ergibt sich entsprechend

$$A_M = A_a = n \cdot \pi \cdot d_a \cdot L \quad (10)$$

## Membranfläche und Strömungsgeschwindigkeit

Für Hohlfaser- oder Kapillarmodule hängt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in den einzelnen Fasern vom Volumenstrom, vom Innendurchmesser der Faser sowie von der Anzahl parallel durchströmter Fasern ab. Die Modullänge beeinflusst die Membranfläche, jedoch nicht unmittelbar die axiale Strömungsgeschwindigkeit in der einzelnen Faser.

Die innere Membranfläche eines Moduls beträgt

$$A_M = n \cdot \pi \cdot d_i \cdot L \quad (11)$$

Dabei sind  $n$  die Anzahl der Fasern,  $d_i$  der Innendurchmesser und  $L$  die Faser- beziehungsweise Modullänge.

Der gesamte freie Strömungsquerschnitt aller Fasern ergibt sich zu

$$A_Q = n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \quad (12)$$

Für einen gegebenen Volumenstrom  $\dot{V}$  folgt daraus für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in den Fasern

$$v = \frac{\dot{V}}{A_Q} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{n \cdot \pi \cdot d_i^2} \quad (13)$$

Aus Gleichung (1) kann die Faseranzahl auch als

$$n = \frac{A_M}{\pi \cdot d_i \cdot L} \quad (14)$$

geschrieben werden. Setzt man diesen Ausdruck in Gleichung (3) ein, so erhält man die Strömungsgeschwindigkeit direkt in Abhängigkeit von Membranfläche, Innendurchmesser, Modullänge und Volumenstrom:

$$v = \frac{4 \cdot \dot{V} \cdot L}{A_M \cdot d_i} \quad (15)$$

Diese Beziehung zeigt:

- Bei konstantem Volumenstrom  $\dot{V}$  sinkt die Strömungsgeschwindigkeit mit wachsender Membranfläche  $A_M$ .
- Mit zunehmendem Innendurchmesser  $d_i$  sinkt die Strömungsgeschwindigkeit ebenfalls.
- Mit zunehmender Modullänge  $L$  steigt die Strömungsgeschwindigkeit, sofern die gesamte Membranfläche  $A_M$  konstant bleibt.

Der letzte Punkt folgt daraus, dass bei konstanter Membranfläche ein längeres Modul weniger Fasern enthält. Dadurch verringert sich der gesamte freie Strömungsquerschnitt, und die Geschwindigkeit in den einzelnen Fasern nimmt zu.

Falls anstelle des Volumenstroms der flächenspezifische Permeatfluss oder die Modulbelastung vorgegeben ist, kann Gleichung (5) als Grundlage für die weitere hydraulische Auslegung verwendet werden.

## Membranfläche und Volumen

Eine zentrale Kenngrösse von Hohlfasermodulen ist das Verhältnis von Membranfläche zum inneren Fluidvolumen. Diese Grösse beschreibt, wie viel aktive Trennfläche pro

Volumeneinheit des strömenden Mediums zur Verfügung steht, und ist für Stofftransport, Verweilzeit und Prozessintensität von entscheidender Bedeutung.

Die innere Membranfläche eines Moduls beträgt

$$A_M = n \cdot \pi \cdot d_i \cdot L \quad (16)$$

Das gesamte Innenvolumen aller Fasern ergibt sich zu

$$V_i = n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \cdot L \quad (17)$$

Das Verhältnis von Membranfläche zu Innenvolumen ist damit

$$\frac{A_M}{V_i} = \frac{n \cdot \pi \cdot d_i \cdot L}{n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_i^2 \cdot L} \quad (18)$$

und vereinfacht sich zu

$$\frac{A_M}{V_i} = \frac{4}{d_i} \quad (19)$$

Diese Beziehung zeigt, dass das Verhältnis ausschliesslich vom Innendurchmesser abhängt und unabhängig von der Faserlänge  $L$  sowie von der Anzahl  $n$  ist.

Mit abnehmendem Innendurchmesser  $d_i$  steigt das Verhältnis  $\frac{A_M}{V_i}$  stark an. Dies bedeutet, dass bei dünneren Fasern eine sehr grosse Membranfläche pro Volumeneinheit des Fluids zur Verfügung steht. Hohlfasermodule erreichen deshalb extrem hohe spezifische Flächen und ermöglichen eine kompakte Bauweise mit hoher Trennleistung.

Gleichzeitig führt ein kleines Innenvolumen dazu, dass die Verweilzeit des Fluids bei gegebenem Volumenstrom gering ist. Dies kann einerseits zu hohen lokalen Stofftransportleistungen führen, andererseits aber auch erhöhte Anforderungen an die Strömungsverteilung und an die Vorbehandlung des Mediums stellen.

Ein weiterer wichtiger Zusammenhang besteht darin, dass bei konstantem Volumenstrom die Strömungsgeschwindigkeit mit abnehmendem Durchmesser zunimmt, da der verfügbare Querschnitt kleiner wird. Dies beeinflusst den Druckverlust sowie das Foulingverhalten direkt.

Das Verhältnis von Membranfläche zu Innenvolumen ist insbesondere relevant für:

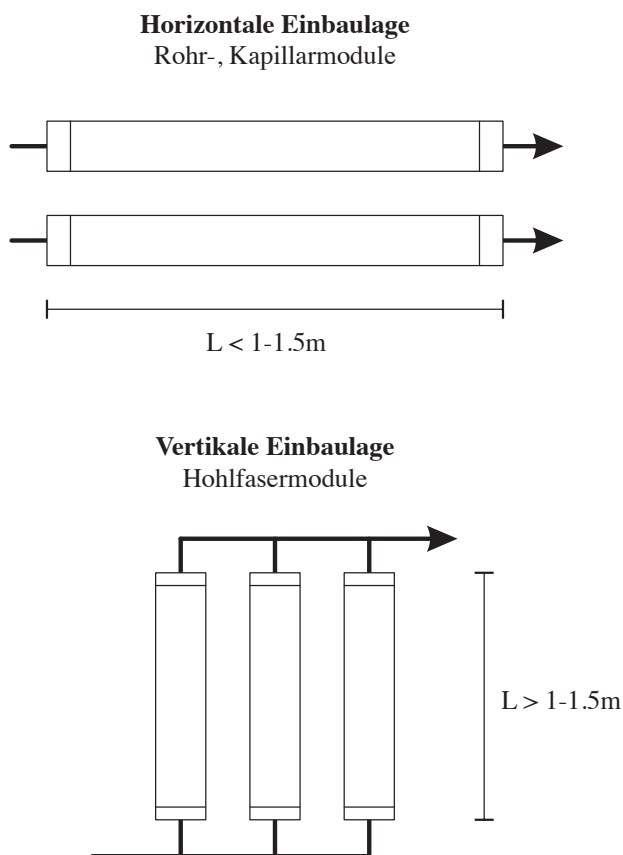
- **die Auslegung von Membranmodulen:** Bewertung von Flächeneffizienz und Kompaktheit,
- **den Stofftransport:** Zusammenhang zwischen verfügbarer Fläche und behandeltem Volumenstrom,
- **die Verweilzeit:** Einfluss auf Reaktions- oder Trennprozesse in gekoppelten Systemen,
- **das Foulingverhalten:** komplexe Wechselwirkungen bei kleinen Durchmessern und hohen Geschwindigkeiten,
- **die Skalierung:** Vergleich unterschiedlicher Membrantypen und Modulkonzepte.

## Einbaulage

Die räumliche Anordnung von Membranmodulen ist eng mit ihrer geometrischen Ausführung verknüpft und hat einen wesentlichen Einfluss auf Strömungsverhalten, Fouling sowie konstruktive Umsetzung. In der Praxis zeigt sich eine typische Zuordnung zwischen Membrantyp und bevorzugter Einbaulage.

Rohrmembranen werden in der Regel horizontal angeordnet. Dies ist vor allem auf ihre vergleichsweise grosse Länge und ihren grossen Durchmesser zurückzuführen, wodurch eine horizontale Bauweise konstruktiv einfacher umzusetzen ist. Zudem erlaubt diese Anordnung eine gute Zugänglichkeit und Wartbarkeit. Ähnliche Überlegungen gelten für Röhrenmembranen, die ebenfalls häufig horizontal betrieben werden.

Kapillarmembranen und Hohlfasermembranen werden demgegenüber meist vertikal angeordnet. Aufgrund ihrer kleinen Durchmesser und der hohen Packungsdichte ist eine vertikale Ausrichtung vorteilhaft, da sie eine gleichmässige Durchströmung unterstützt und die Schwerkraft gezielt genutzt werden kann. Insbesondere können Ablagerungen reduziert sowie Entleerung und Entlüftung der Module verbessert werden.



**Figure 2.** Schematische Einbaulage typischer Membranmodule. Rohr- und Röhrenmembranmodule werden aufgrund ihrer grossen Baulänge bevorzugt horizontal angeordnet, während Kapillar- und Hohlfasermodule mit Längen im Bereich von etwa 1 m typischerweise vertikal eingebaut werden.

## Anströmung

Rohrmembranen können hinsichtlich der Strömungsführung des Feedstroms unterschiedlich betrieben werden. Die Anströmung beeinflusst den Stofftransport, das Foulingverhalten sowie die erreichbare Trennleistung massgeblich. Grundsätzlich lassen sich parallele und serielle Anströmkonzepte unterscheiden.

- **Parallele Anströmung:** Bei der parallelen Anströmung wird der Feedstrom auf mehrere Membrankanäle oder Module gleichzeitig aufgeteilt. Alle Stränge werden damit unter ähnlichen Betriebsbedingungen betrieben. Dieses Konzept ermöglicht eine gleichmässige Belastung der Membranflächen und führt in der Regel zu geringeren Druckverlusten. Zudem ist die Skalierung durch Parallelschaltung vergleichsweise einfach realisierbar.
- **Serielle Anströmung:** Bei der seriellen Anströmung durchströmt der Feedstrom mehrere Membranmodule nacheinander. Dabei ändern sich entlang der Strömungsrichtung Zusammensetzung und Konzentration des Mediums, was zu variierenden lokalen Betriebsbedingungen führt. Dieses Konzept kann genutzt werden, um hohe Trenngrade zu erreichen, geht jedoch häufig mit zunehmender Konzentrationspolarisation und mit erhöhtem Foulingrisiko in späteren Stufen einher.

In der Praxis werden häufig Kombinationen aus parallelen und seriellen Anordnungen eingesetzt, um sowohl eine effiziente Flächennutzung als auch geeignete Betriebsbedingungen entlang des Prozesses sicherzustellen.

## Risiko der Verstopfung

In Hohlfasermodulen mit vielen parallel angeordneten Fasern besteht ein erhöhtes Risiko der Verstopfung einzelner Strömungskanäle. Aufgrund der sehr kleinen Innendurchmesser können bereits geringe Partikelmengen, Ablagerungen oder Biofilme zu einer teilweisen oder vollständigen Blockade einzelner Fasern führen.

Verstopfungen treten häufig lokal auf und führen zu einer Erhöhung des Strömungswiderstands in den betroffenen Fasern. In der Folge wird der Volumenstrom auf andere, noch offene Fasern umverteilt, wodurch Präferenzströmungen verstärkt werden. Dies führt zu einer ungleichmässigen Belastung des Moduls und kann die Gesamtleistung deutlich reduzieren.

Ein wesentliches Risiko besteht darin, dass sich dieser Effekt selbst verstärkt: Verstopfte Fasern bleiben ungenutzt, während stärker durchströmte Fasern höheren Schubspannungen und einer erhöhten Foulingbelastung ausgesetzt sind. Gleichzeitig können in schwach durchströmten oder stagnierenden Bereichen vermehrt Ablagerungen entstehen, wodurch die Verblockung weiter fortschreitet.

Im Extremfall kann ein signifikanter Teil der Membranfläche inaktiv werden, wodurch die effektive Trennleistung stark abnimmt und der Druckverlust im System ansteigt. Eine sorgfältige Vorbehandlung des Feedstroms sowie eine regelmässige Reinigung sind daher entscheidend, um Ver-

stopfungsprozesse zu vermeiden und einen stabilen Betrieb sicherzustellen.

## Strömungsregime

Das Strömungsregime innerhalb von Membranen, insbesondere die Unterscheidung zwischen laminarer und turbulenter Strömung, hat einen entscheidenden Einfluss auf Stofftransport, Foulingverhalten und Trennleistung.

In Rohr- und Röhrenmembranen liegt aufgrund der vergleichsweise grossen Durchmesser und der höheren Strömungsgeschwindigkeiten häufig turbulente Strömung vor. Turbulenz führt zu einer intensiven Durchmischung quer zur Hauptströmungsrichtung, wodurch Konzentrationsgradienten an der Membranoberfläche reduziert werden. Dies verringert die Konzentrationspolarisation und kann Foulingprozesse abschwächen, was insgesamt zu stabileren Betriebsbedingungen führt.

Demgegenüber herrscht in Kapillar- und Hohlfasermembranen aufgrund der sehr kleinen Durchmesser meist laminare Strömung. In diesem Fall erfolgt der Stofftransport quer zur Strömungsrichtung primär durch molekulare Diffusion, da keine nennenswerte makroskopische Durchmischung stattfindet. Dies begünstigt die Ausbildung von Konzentrationsgrenzschichten an der Membranoberfläche, wodurch Konzentrationspolarisation und Fouling verstärkt auftreten können.

## Eintrittseffekte

Beim Eintritt eines Fluids in einen Membrankanal stellt sich das Strömungsprofil nicht unmittelbar vollständig ausgebildet ein. Stattdessen entsteht eine Eintrittszone, in der sich sowohl das Geschwindigkeitsprofil als auch die Konzentrations- und Grenzschichtprofile entlang der Strömungsrichtung entwickeln.

In dieser Einlaufstrecke ist das Geschwindigkeitsprofil zunächst vergleichsweise flach und wird erst mit zunehmender Länge in das für laminare oder turbulente Strömung charakteristische Profil überführt. Gleichzeitig beginnen sich hydrodynamische und stoffliche Grenzschichten an der Membranoberfläche auszubilden. Diese Entwicklung beeinflusst den lokalen Stofftransport und führt dazu, dass Permeatfluss und Trennleistung entlang der Membran variieren können.

Eintrittseffekte sind insbesondere in Kapillar- und Hohlfasermembranen von Bedeutung, da aufgrund der kleinen Durchmesser die Eintrittslänge im Verhältnis zur Gesamtlänge gross sein kann. In solchen Fällen ist ein erheblicher Teil der Membranfläche von nicht voll entwickelten Strömungs- und Konzentrationsprofilen geprägt. In Rohr- und Röhrenmembranen ist dieser Effekt hingegen meist weniger ausgeprägt, da sich die Strömung rascher vollständig entwickelt.

## Druck und Temperatur

Druck und Temperatur sind zentrale Betriebsparameter in der druckgetriebenen Membrantechnik und haben einen

wesentlichen Einfluss auf Trennleistung, Permeatfluss sowie Foulingverhalten.

Der Transmembrandruck stellt die treibende Kraft für den Stofftransport durch die Membran dar. Mit steigendem Druck nimmt der Permeatfluss in der Regel zu, jedoch oft nicht linear, da gleichzeitig Konzentrationspolarisation und Fouling verstärkt werden können. Rohrmembranen sind aufgrund ihrer robusten Bauweise für den Betrieb bei vergleichsweise hohen Drücken geeignet, was insbesondere bei viskosen oder feststoffhaltigen Medien von Vorteil ist.

Die Temperatur beeinflusst vor allem die physikalischen Eigenschaften des Fluids, insbesondere die Viskosität und die Diffusionskoeffizienten. Mit steigender Temperatur sinkt typischerweise die Viskosität, was zu höheren Permeatflüssen und verbesserten Stofftransportbedingungen führt. Gleichzeitig können jedoch Foulingprozesse beschleunigt oder die Stabilität der Membranmaterialien beeinträchtigt werden.

## Druckverlust in Rohrmembranen

Der Druckverlust in einer Rohrmembran hängt wesentlich vom Innendurchmesser  $D$ , von der Membranlänge  $L$ , von der mittleren Fliessgeschwindigkeit  $v$  sowie von der dynamischen Viskosität  $\mu$  des Fluids ab. Für die Berechnung wird die Rohrmembran als zylindrischer Strömungskanal betrachtet.

Der Druckverlust lässt sich allgemein mit der Darcy-Weisbach-Gleichung beschreiben:

$$\Delta p = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (20)$$

Dabei sind  $\Delta p$  der Druckverlust,  $\lambda$  der Rohrreibungsbeiwert,  $\rho$  die Dichte des Fluids,  $L$  die Länge der Rohrmembran,  $D$  der hydraulische Durchmesser und  $v$  die mittlere Fliessgeschwindigkeit.

Zur Charakterisierung des Strömungsregimes wird die Reynolds-Zahl verwendet:

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (21)$$

Für laminare Strömung, typischerweise bei  $\text{Re} < 2300$ , ergibt sich der Rohrreibungsbeiwert zu

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (22)$$

Durch Einsetzen in die Darcy-Weisbach-Gleichung folgt für laminare Strömung:

$$\Delta p = \frac{32 \mu L v}{D^2} \quad (23)$$

Diese Beziehung zeigt, dass der Druckverlust bei laminarer Strömung proportional zur Viskosität  $\mu$ , zur Länge  $L$  und zur Fliessgeschwindigkeit  $v$  ist und mit zunehmendem Durchmesser  $D$  stark abnimmt.

Für turbulente Strömung, typischerweise bei  $\text{Re} > 4000$ , ist der Rohrreibungsbeiwert nicht mehr direkt proportional

zur Reynolds-Zahl. Für glatte Rohre kann näherungsweise die Blasius-Korrelation verwendet werden:

$$\lambda = 0,3164 \operatorname{Re}^{-0,25} \quad (24)$$

Damit ergibt sich für turbulente Strömung:

$$\Delta p = 0,3164 \operatorname{Re}^{-0,25} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (25)$$

Für Rohrmembranen mit Innendurchmessern im Bereich von etwa 3 mm bis 25 mm ist je nach Betriebszustand sowohl laminares als auch turbulentes Strömungsverhalten möglich. Kleine Durchmesser und hohe Viskositäten führen bei gegebener Geschwindigkeit zu erhöhten Druckverlusten. Insbesondere bei viskosen Medien ist die laminare Näherung häufig zweckmässig.

### Transmembrandruck in Rohrmembranen

Der Transmembrandruck (TMP) ist die treibende Kraft für den Stofftransport durch die Membran und beschreibt die mittlere Druckdifferenz zwischen Feed- und Permeatseite.

Aufgrund von Reibungsverlusten nimmt der Druck auf der Feedseite entlang der Rohrmembran ab. Für eine eindimensionale Betrachtung wird daher ein mittlerer Transmembrandruck definiert als

$$\operatorname{TMP} = \frac{p_{\text{in}} + p_{\text{out}}}{2} - p_{\text{P}} \quad (26)$$

Mit dem Druckverlust entlang der Membran

$$\Delta p = p_{\text{in}} - p_{\text{out}} \quad (27)$$

ergibt sich der mittlere Feeddruck zu

$$\bar{p} = p_{\text{in}} - \frac{\Delta p}{2} \quad (28)$$

und damit

$$\operatorname{TMP} = \bar{p} - p_{\text{P}} \quad (29)$$

Der Transmembrandruck wird somit direkt durch den Druckverlust entlang der Membran bestimmt.

### Transmembrandruck bei seriell geschalteten Modulen

Werden  $n$  Membranmodule in Serie betrieben und ist der Druckverlust pro Modul bei gegebenem Betriebspunkt konstant, so ergibt sich mit dem Gesamtdruckabfall

$$\Delta p_{\text{ges}} = p_{\text{in}} - p_{\text{out}} \quad (30)$$

ein konstanter Druckverlust pro Modul

$$\Delta p = \frac{\Delta p_{\text{ges}}}{n} \quad (31)$$

Aufgrund der Serienschaltung gilt

$$p_i^{\text{nach}} = p_{i+1}^{\text{vor}} \quad (32)$$

Für das  $i$ -te Modul folgt damit

$$p_i^{\text{vor}} = p_{\text{in}} - (i-1) \Delta p, \quad p_i^{\text{nach}} = p_{\text{in}} - i \Delta p \quad (33)$$

Der mittlere Feeddruck ergibt sich zu

$$\bar{p}_i = p_{\text{in}} - \left(i - \frac{1}{2}\right) \Delta p \quad (34)$$

und damit der Transmembrandruck

$$\operatorname{TMP}_i = \bar{p}_i - p_{\text{P}} = p_{\text{in}} - \left(i - \frac{1}{2}\right) \Delta p - p_{\text{P}} \quad (35)$$

Der Transmembrandruck nimmt entlang der Modulreihe monoton ab.

Der Transmembrandruck nimmt somit entlang der Modulreihe monoton ab.

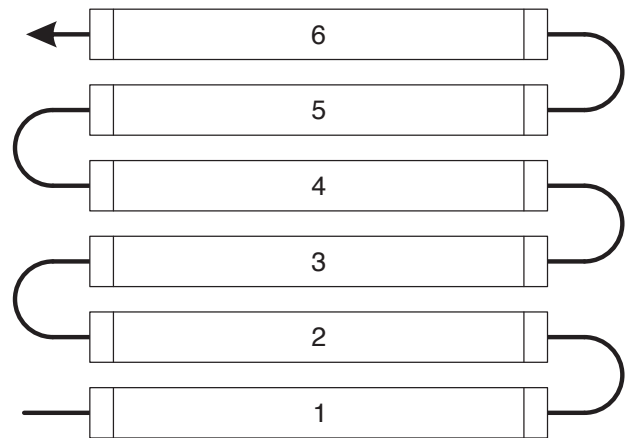


Figure 3. xxx

### Reinigung(CIP)

Die Reinigung von Rohrmembranen erfolgt in der Regel mittels *Cleaning in Place* (CIP), also eines Verfahrens, bei dem die Membranmodule ohne Demontage im eingebauten Zustand gereinigt werden. Ziel der CIP-Reinigung ist die Entfernung von Foulingsschichten wie Partikelablagerungen, organischen Verbindungen, Biofilmen oder anorganischen Ausfällungen, um die Leistungsfähigkeit der Membran wiederherzustellen.

Rohrmembranen bieten aufgrund ihres vergleichsweise grossen Durchmessers und ihrer robusten Bauweise günstige Voraussetzungen für eine wirksame CIP-Reinigung. Insbesondere können hohe Strömungsgeschwindigkeiten und damit erhöhte Schubspannungen realisiert werden, was die Ablösung von Ablagerungen unterstützt. Dies stellt einen wesentlichen Vorteil gegenüber feineren Membranstrukturen wie Kapillaren oder Hohlfasern dar.

Der CIP-Prozess umfasst typischerweise mehrere Schritte, darunter Spülen, chemische Reinigung, beispielsweise mit sauren, alkalischen oder oxidativen Reinigungsmitteln, sowie eine abschliessende Nachspülung. Die Auswahl der Reinigungsmittel und Betriebsbedingungen hängt von der Art des Fouling sowie von der chemischen Beständigkeit der Membran ab.

## Anschlüsse

Die Anschlüsse von Rohrmembranen stellen eine zentrale Schnittstelle zwischen Membranmodul und Prozessperipherie dar. Sie dienen der sicheren Zu- und Abführung von Feed-, Retentat- und Permeatströmen und müssen sowohl mechanischen als auch chemischen Anforderungen genügen.

Typischerweise kommen bei Rohrmembranen standardisierte Rohrverbindungen zum Einsatz, beispielsweise Flanschverbindungen, Gewindeanschlüsse oder hygienische Klemmverbindungen wie Tri-Clamp-Systeme. Die Wahl des Anschlusses hängt von Druckniveau, Temperatur, Medium sowie von den Anforderungen an Dichtheit und Reinigbarkeit ab.

Ein wesentliches Kriterium ist die druckfeste und leakagefreie Ausführung der Verbindungen, da Membranprozesse häufig unter erhöhtem Betriebsdruck stattfinden. Gleichzeitig müssen die Anschlüsse so gestaltet sein, dass Toträume minimiert werden, um Ablagerungen und mikrobiologisches Wachstum zu vermeiden. Dies ist insbesondere in hygienisch sensiblen Anwendungen von Bedeutung.

Darüber hinaus spielen konstruktive Aspekte wie einfache Montage und Demontage, Wartungsfreundlichkeit sowie die Möglichkeit zur Integration in modulare Anlagenkonzepte eine wichtige Rolle.

## Reparatur

Aufgrund ihrer robusten Bauweise und ihrer vergleichsweise grossen Geometrie bieten Rohrmembranen im Allgemeinen bessere Möglichkeiten zur Instandsetzung als fein strukturierte Membrantypen.

Typische Schadensbilder umfassen mechanische Beschädigungen, Undichtigkeiten an Dichtstellen sowie irreversible Fouling- oder Scalingeffekte. In vielen Fällen können defekte Dichtungen ersetzt, einzelne Module ausgetauscht oder beschädigte Rohrsegmente repariert werden, ohne das gesamte System stillzulegen.

Ein Vorteil von Rohrmembranen liegt in ihrer guten Zugänglichkeit, wodurch Inspektion und Wartung erleichtert werden. Dies ermöglicht eine gezielte Fehlerlokalisierung und reduziert den Aufwand für Reparatur-

massnahmen. Dennoch hängen die Möglichkeiten zur Reparatur vom Membranmaterial und vom konkreten Moduldesign ab; bei integralen Membranstrukturen ist häufig der Austausch der gesamten Einheit erforderlich.

## Systeme

### Rohrmembranen

Membransysteme auf Basis von Rohrmembranen zeichnen sich durch eine vergleichsweise einfache und robuste Architektur aus. Die grundlegende Einheit bildet dabei das einzelne Rohrmembranmodul.

Mehrere Rohrmembranen werden typischerweise seriell verschaltet.

Die Systemarchitektur umfasst neben den Membranmodulen auch die notwendigen Verteil- und Sammelsysteme für Feed, Permeat und Retentat. Eine gleichmässige Strömungsverteilung ist entscheidend, um eine ungleichmässige Auslastung einzelner Membranbereiche zu vermeiden.

Rohrmembranen ermöglichen hohe Schubspannungen an der Membranoberfläche, was Foulingeffekte reduziert.

Die modulare Bauweise erlaubt eine flexible Anpassung an unterschiedliche Prozessanforderungen, sowohl hinsichtlich Kapazität als auch hinsichtlich Trenngrad. Gleichzeitig führt die vergleichsweise geringe Packungsdichte im Vergleich zu Kapillar- oder Hohlfasermodulen zu grösseren Bauvolumina und höheren Investitionskosten.

Insgesamt ist die Architektur von Rohrmembransystemen durch Robustheit, gute Reinigbarkeit und hohe Betriebssicherheit geprägt, was sie insbesondere für Anwendungen mit anspruchsvollen Medien geeignet macht.

### Hohlfaser

Die sehr hohe Packungsdichte von Hohlfasern ermöglicht grosse Membranflächen in kompakten Modulen. Gleichzeitig erfordert die feine Struktur eine gleichmässige Strömungsverteilung sowie eine sorgfältige Vorbehandlung des Feedstroms, um Verblockungen und Fouling zu vermeiden.

## Grössen, Einheiten und Definitionen

Grösse	Bezeichnung	Einheit	Definition
$A_{i,1}$	innere Fläche einer einzelnen Faser	$m^2$	Innenfläche einer einzelnen Hohlfaser oder Kapillare
$A_{a,1}$	äussere Fläche einer einzelnen Faser	$m^2$	Aussenfläche einer einzelnen Hohlfaser oder Kapillare
$A_i$	gesamte innere Membranfläche	$m^2$	Summe der inneren Flächen aller Fasern eines Moduls
$A_a$	gesamte äussere Membranfläche	$m^2$	Summe der äusseren Flächen aller Fasern eines Moduls
$A_M$	Membranfläche	$m^2$	wirksame Membranfläche des Moduls
$A_Q$	freier Strömungsquerschnitt	$m^2$	Summe der freien inneren Querschnitte aller parallelen Fasern
$V_i$	Innenvolumen	$m^3$	gesamtes freies Innenvolumen aller Fasern
$d_i$	Innendurchmesser	m	innerer Durchmesser einer Faser, Kapillare oder Rohrmembran
$d_a$	Aussendurchmesser	m	äusserer Durchmesser einer Faser oder Kapillare
$D$	hydraulischer Durchmesser	m	charakteristischer Durchmesser des Strömungskanals
$L$	Länge	m	Länge der Faser, Kapillare oder Rohrmembran
$n$	Anzahl der Fasern	–	Anzahl parallel angeordneter Fasern oder Kapillaren
$\dot{V}$	Volumenstrom	$m^3 s^{-1}$	dem Modul zugeführter Volumenstrom
$v$	mittlere Strömungsgeschwindigkeit	$m s^{-1}$	mittlere axiale Geschwindigkeit in der Faser oder Membranröhre
$\Delta p$	Druckverlust	Pa	Druckabfall entlang eines Membrankanals oder Moduls
$p_{in}$	Eintrittsdruck	Pa	Druck am Eintritt des ersten Moduls bzw. Kanals
$p_{out}$	Austrittsdruck	Pa	Druck am Austritt des letzten Moduls bzw. Kanals
$p_i^{vor}$	Druck vor Modul $i$	Pa	Druck am Eintritt des $i$ -ten Moduls
$p_i^{nach}$	Druck nach Modul $i$	Pa	Druck am Austritt des $i$ -ten Moduls
$\bar{p}_i$	mittlerer Feeddruck in Modul $i$	Pa	mittlerer Druck auf der Feedseite des $i$ -ten Moduls
$p_P$	Permeatdruck	Pa	Druck auf der Permeatseite
$TMP_i$	Transmembrandruck in Modul $i$	Pa	mittlere Druckdifferenz zwischen Feed- und Permeatseite des $i$ -ten Moduls
$d$	Druckverlust pro Modul	Pa	Druckabfall über ein einzelnes Modul in Serienschaltung
$\rho$	Dichte	$kg m^{-3}$	Dichte des Fluids
$\mu$	dynamische Viskosität	Pa s	dynamische Viskosität des Fluids
$\lambda$	Rohrreibungsbeiwert	–	dimensionsloser Reibungsbeiwert nach Darcy-Weisbach
Re	Reynolds-Zahl	–	dimensionslose Kennzahl zur Charakterisierung des Strömungsregimes

**Table 2.** Verwendete Grössen, Einheiten und Definitionen