

# Membrantechnik zur Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung



DER BRANCHENKLASSIKER IN NEUER AUFLAGE

# NACHSCHLAGEWERK FÜR DIE ABWASSERBEHANDLUNG



Dieses Buch beschreibt praxisnahe Lösungen:

- für Planung und Betrieb von industriellen Abwasseranlagen
- Anforderungen und praxisorientierte Lösungen für verschiedene Branchen
- Orientierung für Lösungsansätze und spezifische Erfahrungen, dargestellt von über 30 Autoren aus Wirtschaft und Wissenschaft

Jetzt im  
Shop bestellen  
und Wissen sichern!

[www.vulkan-shop.de](http://www.vulkan-shop.de)

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Rosenwinkel, Prof. Dr.-Ing. Ute Austermann-Haun,  
Prof. Dr.-Ing. Stephan Köster, Dr.-Ing. Maike Beier  
2. Auflage 2019  
Artikelnummer: 73984  
Preis: € 75,-

VULKAN VERLAG. FÜR ALLE, DIE MEHR WISSEN WOLLEN.

[www.vulkan-verlag.de](http://www.vulkan-verlag.de)

 Vulkan Verlag

# Eine Membran kommt selten allein

Liebe Leserinnen und Leser, vor über zehn Jahren saß ich im Eröffnungsvortrag einer Aachener Tagung mit dem Schwerpunkt Wasser und Membranen, als die – provokativ gemeinte – Frage gestellt wurde: „Wozu muss man noch Forschung zum Thema Membrantechnik in der Wasseraufbereitung machen und diese auf Kongressen publizieren? Es ist doch schon alles erforscht und gesagt, was man dazu wissen muss.“ Das war damals nicht ernst gemeint und gilt heute immer noch nicht. Nach Jahrzehnten der Forschung und Entwicklung und den gemachten Betriebserfahrungen mit unzähligen Anlagen zur Meerwasserentsalzung inklusive Vorbehandlung, zur Trink- und Prozesswasseraufbereitung, zur industriellen Abwasserbehandlung sowie zur kommunalen Abwasserbehandlung mit Membranbioreaktoren kann die Fachwelt natürlich auf ein sehr breites und stabiles Fundament an Wissen über Materialien, Modultechnik, Anlagenbau und Betriebsweisen zurückgreifen. Heute zielen Forschung, Entwicklung sowie die aufgabenangepasste Prozess- und Anlagenoptimierung auf neue Herausforderungen für die Wasserwirtschaft ab. Diese ergeben sich einmal aus einer sich ändernden Verfügbarkeit von Wasser und dem daraus erwachsenen Anspruch, diese Ressource mehr denn je möglichst sparsam einzusetzen beziehungsweise wiederzuverwenden. Zum anderen besteht die dringende Notwendigkeit, praktikable Lösungen zur Elimination von Mikroschadstoffen, Mikroplastik und Keimen aus unseren Abwässern und aus den Rohwässern der Trinkwasserwerke zu finden. Membranen stellen hier eine wesentliche Komponente in einem Mix aus Verfahren dar, sodass der optimale, an eine bestimmte Rohwasserqualität und das Aufbereitungsziel angepasste Prozess meistens ein mehrstufiger oder Hybrid-Prozess ist. Nachfolgend sind diverse Beispiele gegeben sowohl für die Wasser- als auch zur Abwasseraufbereitung. Eine besondere Herausforderung für die Meerwasserentsalzung sowie eine Vielzahl von industriellen Wasseraufbereitungsprozessen stellt auch der Umgang mit Konzentraten dar, die einen hohen Salzgehalt aufweisen. Auch zu diesem Thema wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung und Technik gegeben. Neben der Entwicklung von Prozessketten mit etablierten Membranmaterialien finden sich auch Anwendungen mit neuartigen Membranen, die beispielsweise mit Hilfe der Layer-by-Layer-Beschichtung von mikroporösen Substraten oder durch Integration der aus Zellmembranen bekannten Aquaporine in technische Membranen entstanden sind. Am Ende wagen wir einen kurzen Ausblick in die Entwicklung von Materialien, die bisher noch nicht marktfähig sind. Ich bin sicher, die Geschichten aus dieser Branche sind noch nicht alle zu Ende erzählt.

Herzliche Grüße

**Dr. Hildegard Lyko**  
Redakteurin



# Inhalt

## ■ Grundlagen

Vermeidung von Engpässen in der Trinkwasserversorgung durch den Einsatz von druckgetriebene Membran-Verfahren \_\_\_\_\_ 4

## ■ Trinkwasseraufbereitung

Hybridkreislaufsystem für die Partikel- und Spurenstoffentfernung \_\_\_\_\_ 10

Wasserwerk Weyer: Mehrstufige Aufbereitung von Brunnenwasser \_\_\_\_\_ 19

## ■ Abwasserbehandlung

Kombiniertes Verfahren aus Ultrafiltration (UF) und Pulveraktivkohle (PAK) zur Abtrennung von Spurenstoffen, Keimen und Phosphor im Kläranlagenablauf \_\_\_\_\_ 23

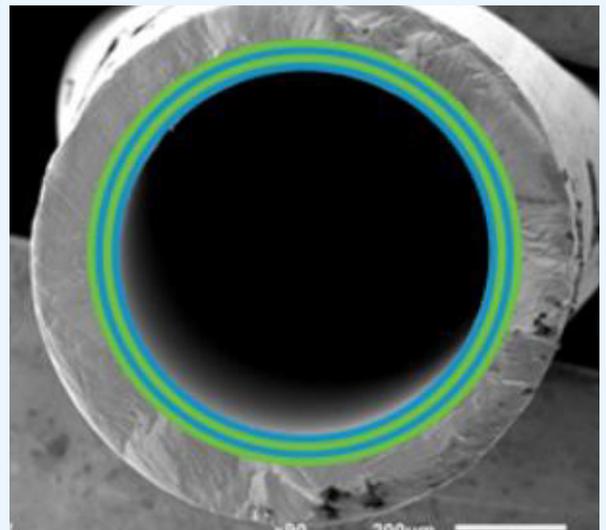
Auftreten und Entfernung von antibiotika-resistenten E. coli aus städtischem Abwasser am Beispiel zweier norwegischer Abwasserkläranlagen \_\_\_\_\_ 31

Prozessoptimierung einer Umkehrosmose als vierte Reinigungsstufe \_\_\_\_\_ 40

Weitestgehende Phosphorentfernung und Synergieeffekte der Tuch- und Membranfiltration als nachgeschaltete Filtrationsverfahren in der Abwasserbehandlung \_\_\_\_\_ 46



**Seite 19:** Dreistraßige Nanofiltration als Bestandteil einer mehrstufigen Brunnenwasseraufbereitung



**Seite 63:** Grafische Darstellung der Layer-by-Layer-Struktur einer Hohlfasermembran, die zur Spurenstoffentfernung mittels Nanofiltration eingesetzt werden kann

Mikroschadstoffelimination und Schließen des Wasserkreislaufes  
mithilfe der Hohlfaser-Nanofiltration \_\_\_\_\_ 62

Grauwasser-Recycling: raus aus der Nische \_\_\_\_\_ 66

## ■ Prozesswasser / Industrieabwasser

Konzentrierung und Behandlung hochsalzhaltiger Lösungen \_\_\_\_\_ 69

Keramische Filtersysteme für Aquafarming in geschlossenen Kreisläufen \_\_\_\_\_ 73

Verwertung von Brüdenkondensaten aus der Klärschlammverbrennung \_\_\_\_\_ 74

Membrantechnik: Hoher Reinheitsgrad, reduzierte Kosten \_\_\_\_\_ 76

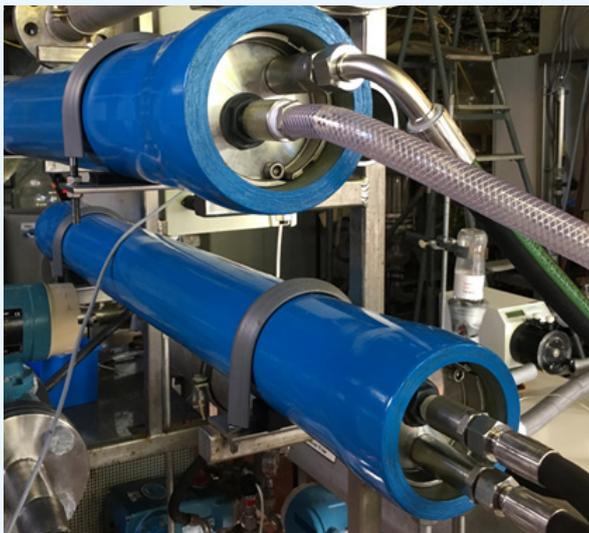
Auslegung und Betrieb von ZLD-Anlagen in der Nahrungsmittelindustrie  
und in der Oberflächentechnik \_\_\_\_\_ 77

Galvanikbäder mit der Sonne aufkonzentrieren \_\_\_\_\_ 79

## ■ Neue Membranen

Entwicklung eines naturgetreuen Wasserfilters durch Kombination  
von Biologie und Ingenieurtechnik \_\_\_\_\_ 81

Funktionelle Membranen für die Wasser- und Abwasseraufbereitung \_\_\_\_\_ 84



**Seite 69:** Druckrohre für die Hochdruckumkehrosmose bei 120 bar zur Aufbereitung hochsalzhaltiger Lösungen, die z.B. als Konzentrate der Industrieabwasserbehandlung anfallen



**Seite 74:** Ultrafiltration von Brüdenkondensaten aus der Klärschlammverbrennung mit keramischen Rohrmembranen

# Vermeidung von Engpässen in der Trinkwasserversorgung durch den Einsatz von druckgetriebene Membran-Verfahren

In vielen Gebieten der Erde ist es nicht mehr möglich, den wachsenden Wasserbedarf durch herkömmliche Verfahren der Wasser-Beschaffung und Wasser-Aufbereitung abzudecken. Daher wird die zunehmende Anwendung bzw. Umsetzung der wichtigsten Möglichkeiten zur Absicherung der Wasserversorgung gemäß Bild 1 erforderlich, die da sind:

- a. der bewusste Umgang mit Trinkwasser („Vermeidung von Vergeudung“) zur Optimierung der Nutzung der Ressourcen;
- b. die Nutzung von gereinigtem Abwasser unter Berücksichtigung eines qualitätsgestaffelten Ansatzes basierend auf Kreisläufen, Wiederverwendung und Mehrfach-Nutzung sowie
- c. die Produktion von Trinkwasser aus Brackwasser und Meerwasser.

Für die erfolgreiche Realisierung der unter b. und c. genannten Strategien sind fortschrittliche Prozesse zur Wasseraufbereitung wie die Membranverfahren notwendig.

## Problemlösungen mit Membranverfahren

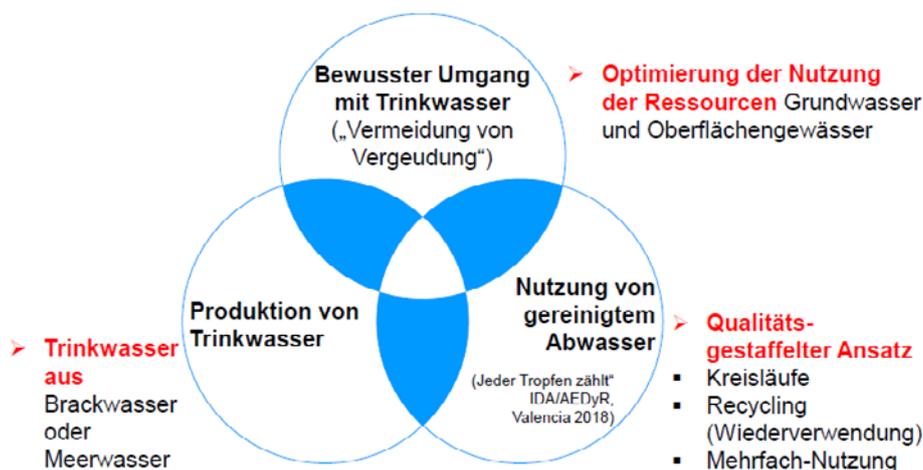
Membranverfahren können heutzutage in sehr vielen Bereichen der zentralen und dezentralen Trinkwasserversorgung zur zuverlässigen und sicheren Deckung des Wasserbedarfes beitragen. Sie sind ebenso aber auch zur Lösung vielzähliger Aufgabenstellungen in der Wasserwirtschaft und der Umwelttechnik einsetzbar.

Verfahrenstechnische Grundlage ist die Funktion der Membranen als definierte selektive Barrieren gemäß **Bild 2**, Voraussetzungen für einen erfolgreichen Einsatz sind dabei die Verwendung von aufgabenstellungsorientiert ausgewählten Membranen und Modulen sowie neben einer strikt problemspezifischen Anlagenauslegung die Verwendung hochwertiger Materialien bei der Anlagenerfertigung. Ebenso muss der durch geschultes Personal

zu betreuende Anlagenbetrieb an jeden Einzelfall angepasst werden und die lokalen rechtlichen, logistischen und infrastrukturellen Randbedingungen berücksichtigen.

Basierend auf vielzähligen entsprechend dokumentierten Beispielen und Erfolgsberichten [1] kann festgestellt werden, dass die Leistungsfähigkeit der druckgetriebenen Membranverfahren Mikrofiltration (MF), Ultrafiltration (UF), Nanofiltration (NF) und Umkehrosmose (UO) aus technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Sicht nachvollziehbar geprüft und bewiesen wurde. Diese Verfahren können heute als bewährte und sehr erfolgreiche Instrumente des Chemieingenieurwesens angesehen werden, die beispielsweise helfen, Wasserknappheit oder Wasserverschmutzung zu vermeiden, oder die eine Rückgewinnung und

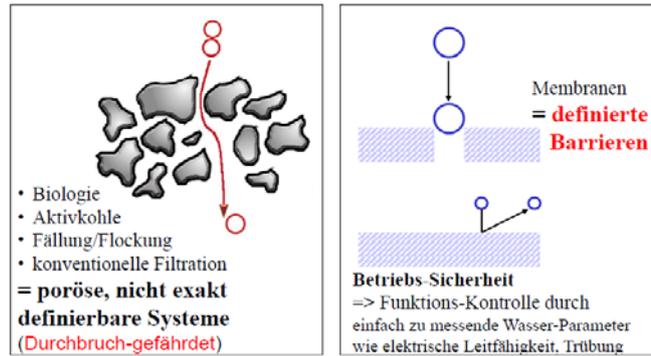
(Quelle: Peters)



**Bild 1:** Möglichkeiten zur Absicherung der Wasserversorgung

Aufbereitung wertvoller Stoffe ermöglichen. In Kombination mit anderen Verfahren können die als Retentat bzw. Konzentrat bezeichneten systembedingt anfallenden Rest-Wassermengen deutlich reduziert werden, was Kosten spart, aber auch beispielsweise die Förderung einer nachhaltig umweltverträglichen abwasserfreien Produktion (Zero Liquid Discharge, ZLD) möglich macht [2].

Die hieraus erwachsenen Anforderungen an die Wasseraufbereitung haben zu Entwicklungen geführt, in deren Rahmen in einzelnen Bereichen bisher nicht übliche, aber anderweitig in der Wasserwirtschaft bewährte nachhaltige und kostenoptimierte Verfahren zur Aufbereitung von Wasser oder Abwasser erfolgreich an diesbezügliche Aufgabenstellungen adaptiert wurden. Neben der Optimierung konventioneller Prozesse gehören hierzu zunehmend die hier näher betrachteten druckgetriebenen Membran-Verfahren, deren Vorteile auch aus der Darstellung „Interdependenzen zwischen Verfahren zur Behandlung bzw. Aufbereitung von Abwasser, abtrennbaren Inhaltsstoffen und verbleibenden Reststoffen“ gemäß **Bild 3** abgeleitet werden können [3]. Die in dieser Abbildung 3 dargestellten Einzelheiten und Zusammenhänge soll helfen, ein phänomenologiebasiertes Grundverständnis zur Identifizierung geeigneter Verfahren zur Aufbereitung von Wasser, Abwasser und Prozessflüssigkeiten zur vermitteln, die dann in Abstimmung mit Experten für den erfolgreichen großtechnischen Einsatz untersucht, geplant und umgesetzt werden können [4].



(Quelle: Peters)

**Bild 2:** Unterschied zwischen konventionellen Prozessen und Membranprozessen

Eine Herausforderung mit zunehmender Bedeutung ist in diesem Zusammenhang der Schwerpunkt ‚kommunales Abwasser‘, der vom Autor mit dem Begriff „M3-Gesundheits-Gefährdungspotenzial“ beschrieben wird. Hier können Membranen als Einzelschritt oder in Kombinationsverfahren erfolgreich zur Abtrennung von Mikro-Schadstoffen, Mikro-Plastik und Mikroben, einschließlich multiresistenter Keime, eingesetzt werden.

### Wirkprinzip von druckgetriebenen Membranverfahren

Obwohl Membranverfahren hinlänglich bekannt zu sein

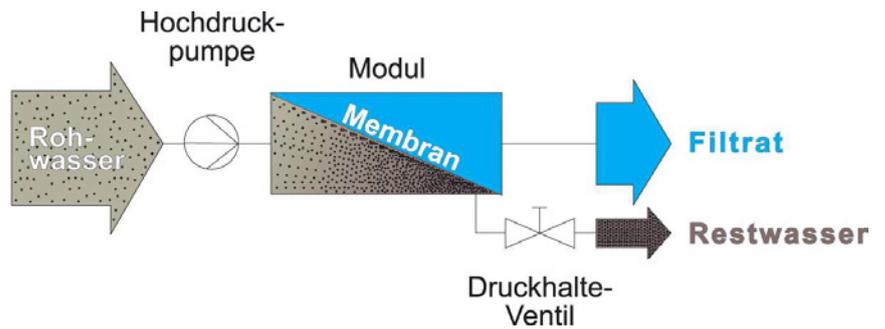
Verfahren	Inhaltstoffe	abfiltrierbare Feststoffe	CSB	Ammonium	AOX	Schwermetalle	Eisen, Mangan	Salze	PAK	LHKW	Bakterien	Viren	bleibende Reststoffe
1.1 Biologischer Abbau	o	o	+	o	-	o	-	-	o	-	-	-	Schlamm
1.2 Chemische Oxidation	-	+	o	+	-	o	-	+	+	+	+	+	Abluft
2.1 Adsorption	o	o	-	+	o	-	-	+	+	-	-	-	Beladene A-Kohle
2.2 Eindampfung	+	+	+	o	+	+	+	o	-	-	-	-	Reststoffe, Abluft
2.3 Elektrodialyse	-	-	o	-	+	+	+	-	-	-	-	-	Restwasser
2.4 Flockung/Fällung	o	o	+	o	+	+	-	-	-	-	-	Schlamm	
2.5 Flotation (MBF)	+	o	-	+	+	+	-	+	-	o	o	Schlamm	
2.6 Ionenaustausch	-	-	o	o	+	+	+	-	-	-	-	-	Konzentrat
2.7 Stripping	-	-	+	o	-	-	-	o	+	-	-	-	Abluft
2.8 Filtration	+	-	-	-	o	+	-	-	-	-	-	-	Schlamm
2.9 Mikrofiltration	+	-	-	-	o	+	-	-	-	-	+	o	Restwasser
2.10 Ultrafiltration	+	o	-	-	o	+	-	-	-	-	+	+	Restwasser
2.11 Nanofiltration	+	+	o	o	+	+	o	o	-	-	+	+	Restwasser
2.12 Umkehrosmose	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Restwasser

**+** = geeignet    **-** = ungeeignet    **o** = teilweise geeignet  
 1.1 - 1.2 = Zerstörung der Inhaltsstoffe    2.1 - 2.11 = Konzentration oder selektive Trennung von Inhaltsstoffen

(1) bei alkalischer Fahrweise    (4) für Sulfat "-"  
 (2) bei saurer Fahrweise    (5) nach Fällung/Flockung  
 (3) MAP-Fällung, sonst "-"

(Quelle: Peters)

**Bild 3:** Interdependenzen zwischen Verfahren zur Behandlung bzw. Aufbereitung von Abwasser, abtrennbaren Inhaltsstoffen und verbleibenden Reststoffen



**Bild 4:** Flussdiagramm als Beispiel für die Funktion der druckgetriebenen Membranverfahren

scheinen, oder sind, und in unzähligen Artikeln und Fachbeiträgen erläutert wurden, weichen Beschreibungen einiger technologischer Details und Fachausdrücke in den Publikationen voneinander ab. Deshalb werden bestimmte Definitionen und technische Details, die üblicherweise von Fachleuten benutzt werden, nachstehend zusammen mit einigen Überlegungen beschrieben, die auf langjähriger Erfahrung auf diesem Gebiet beruhen [2].

Die betrachteten Membranverfahren sind druckgetriebene Trennverfahren, bei denen die Triebkraft ein über die Membranen angelegter Differenzdruck ist. Mittels der Membran wird das zu behandelnde Wasser getrennt in ein Filtrat (die übliche Bezeichnung für das Produktwasser bei der Mikrofiltration [MF] und der Ultrafiltration [UF] bzw. Permeat (die übliche Bezeichnung für das Produkt bei der Nanofiltration [NF] und der Umkehrosmose [UO]) und eine verbleibende Menge Retentat, das auch als Restwasser oder Konzentrat bezeichnet wird (**Bild 4**). Im Retentat werden die von der Membran zurückgehaltenen im Zulauf enthaltenen Schadstoffe bzw. gelösten und ungelösten Komponenten dementsprechend aufkonzentriert.

Diese Verfahren werden üblicherweise im sogenannten Querstrom-Modus (crossflow) betrieben, der es ermöglicht, die Bildung von Ablagerungen oder Schichten an der Membranoberfläche zu kontrollieren und in bestimmtem Umfang eine Reduzierung des Scaling, Fouling und Biofouling bewirkt. Dabei können die negativen Effekte des unvermeidbaren Biofouling bei einem langfristigen Betrieb durch die Anwendung innovativer Reinigungsverfahren positiv beeinflusst werden. Hierzu gehört bei höher belasteten Abwässern insbesondere aber auch der Einsatz von Modulen mit rohwasserseitiger „Offenkanal-Technik“, wie sie weltweit beispielsweise zur Reinigung von Deponie-Sickerwasser und zur Vorbehandlungsschemikalien-freien Meerwasser-Entsalzung sehr erfolgreich angewendet wird [5].

Im Querstrom-Modus wird die zu behandelnde Flüssigkeit über die Membrane(n) gepumpt und in die zwei oben genannten Teilströme aufgeteilt; der Betriebsdruck wird erzielt, indem der von der Einspeisepumpe gelieferte Förderdruck mittels Reduzierung des Querschnittes im Druckregelventil nach der Moduleinheit entsprechend angepasst wird. Für den Betrieb im Dead-End-Modus (der nur bei der MF und UF möglich ist) wird dieses Druckregelventil in genau spezi-

fizierten Intervallen vollständig geschlossen. Wichtig ist, dass in allen Fällen die Spülung, die Rückspülung, die chemisch unterstützte Rückspülung und andere Membranreinigungs-Prozeduren entsprechend ausgewählt sowie konsequent eingesetzt werden und während des langfristigen Betriebs zu optimieren sind. Dabei sei daran erinnert, dass die wichtigste Voraussetzung für den erfolgreichen Betrieb von Membransystemen die unter anderem auch konstruktiv zu beeinflussende Möglichkeit zur regelmäßigen hochwirksamen Reinigung der Membranen ist.

Wie in **Bild 2** dargestellt, können die bei diesen Verfahren eingesetzten Membranen als eindeutig definierte Barrieren betrachtet werden [2]. Dies ermöglicht eine kontinuierliche und reproduzierbare Funktionskontrolle mittels robuster Messinstrumente. Gleichzeitig gewährleistet die Barrierenfunktion der Membranen eine gleichbleibende hohe Qualität des Filtrats bzw. Permeats, die von Konzentrationsänderungen bei den Schadstoffen im Zulauf nahezu unabhängig ist [4].

Mit Membranen bzw. Membranmodulen ausgerüstete Anlagen weisen eine hohe Betriebsstabilität auf, da der Prozess selbst elektrisch gesteuert wird und die Funktionen elektronisch überwacht sind. Zudem ist für die Inbetriebnahme und das Abschalten, das bei strikt einzuhaltender kontinuierlicher langsamer Regelgeschwindigkeit nur wenige Minuten in Anspruch nimmt, keine besondere Aufmerksamkeit notwendig. Die modulare Bauweise der Anlagen ist die Basis für eine hohe Flexibilität in Bezug auf Volumenveränderungen des zu behandelnden Wassers und für eine kleine Aufstellfläche der Anlage. Diese Merkmale resultieren aus den Eigenschaften der Membranen und deren Kombination mit einer geeigneten Modulkonfiguration und Anlagenkonzeption, die allerdings genau an die Anforderungen der jeweiligen Anwendung adaptiert werden müssen. Die Basis für die Auswahl ist dabei das Leistungsspektrum der einzelnen Membran-Verfahren, deren grundsätzliches Wirkprinzip vereinfacht in **Bild 5** dargestellt ist, wichtige zugehörige verfahrenstechnisch relevante Einzelaspekte in den nachfolgenden Kurzbeschreibungen [2]:

**Mikrofiltration (MF):**

Dies ist der Membranprozess mit den geringsten Anforderungen an die Trenngrenze der Membranen. Die MF

wird zur Abtrennung von Bakterien, Pigmenten und anderen Partikeln mit Partikeldurchmessern im Submikronbereich eingesetzt. Verwendet werden poröse Membranen mit Porendurchmessern im Bereich von etwa 0,1 bis 1,0 µm (1 mm = 1.000 µm); kommerzielle Membranen weisen meist eine durchschnittliche Porengröße von 0,2 µm auf. Der Transmembrandruck reicht von 10 bis 500 kPa (0,1 bis 5 bar) und beträgt normalerweise etwa 100 kPa. Bei speziellen Anwendungen, wie bei Membran-Bioreaktor-Anlagen (MBR) mit getauchten Modulen z. B. im Bereich kommunales Abwasser, wird ein Unterdruck angelegt, beispielsweise im Bereich von 0,1 bar.

### Ultrafiltration (UF):

Diese Membranen können Bakterien und Viren zurückhalten und Makromoleküle wie z. B. Proteine abtrennen, ebenso wie kolloidales Silizium und Pyrogene. Typische Trenngrenzen liegen für das Molekulargewicht im Bereich von 5.000 bis 200.000 g/mol. Der Porendurchmesser deckt normalerweise den Bereich von 0,05 bis 0,02 µm ab. Der Transmembrandruck beträgt zwischen 20 und 1.000 kPa (0,2 bis 10 bar), normalerweise zwischen 100 und 300 kPa. Bei speziellen Anwendungen, wie MBR-Anlagen mit getauchten Modulen, wird wiederum ein Unterdruck im Bereich von bis zu 0,2 bar angelegt.

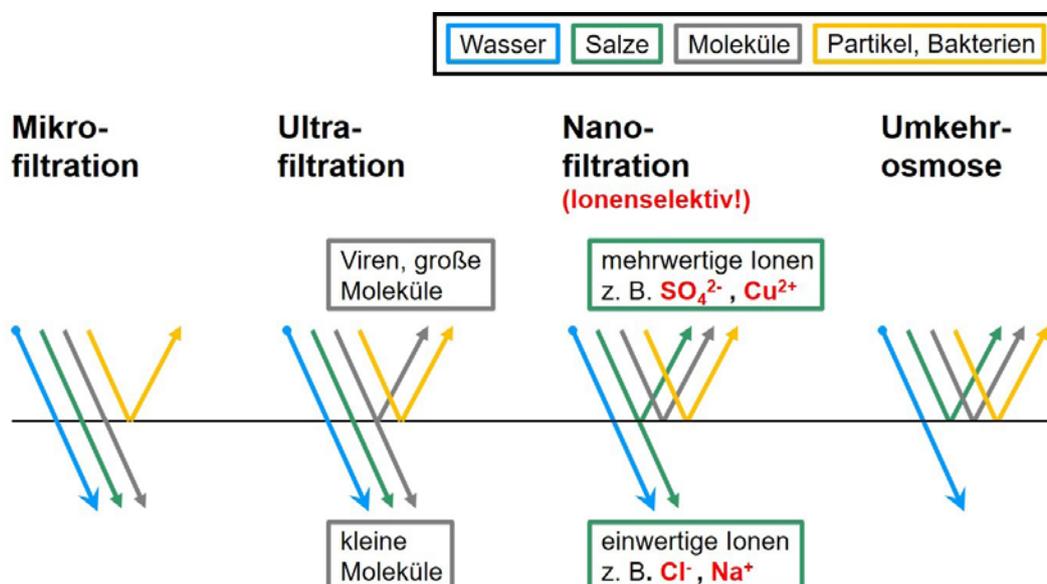
### Nanofiltration (NF):

Die für die NF verwendeten Membranen arbeiten nach dem Lösungs-Diffusionsprinzip. Einwertige Anionen können in hohem Maße durch die Membran diffundieren, während mehrwertige Anionen weitgehend zurückgehalten werden. Vom Trennprinzip her also anders als bei MF und UF, wo die Rückhaltung von Partikeln oder

anderen Wasserinhaltsstoffen durch den Durchmesser der Poren in den Membranen bestimmt wird. NF eignet sich für die Entfernung von Farbstoffen, Zucker und THM (Trihalomethan)-Vorprodukten sowie zur Entfernung von Härte oder Sulfat aus einem Wasserzufluss. Aufgrund der Einsatzmöglichkeit bei niedrigen pH-Werten eignet sich die NF zudem sehr gut für die Reinigung von saurem Grubenabwasser (AMD – acid mine drainage). In Kombination mit der Seeding-Technik (Zudosierung von Impfkristallen) und Hydrozyklon-Klassierung ist es möglich, beispielsweise bei hochkonzentriertem Deponiesickerwasser eine Permeatausbeute von bis zu 95 % zu erzielen [5]. Der Transmembrandruck beträgt bis zu 5.000 kPa (50 bar) und liegt üblicherweise im Bereich von 1.500 bis 2.000 kPa.

### Umkehrosmose (UO):

Bei der Umkehrosmose werden die dichtesten Membranarten eingesetzt. Die Abtrennung der organischen und anorganischen Moleküle aus dem Zulauf erfolgt mit einer Rückhalterate von bis zu 99 % durch einen Lösungs-Diffusionsprozess. UO-Membranen werden zur Abtrennung von in Wasser gelösten Salzen und Ionen mit weniger als 200 D verwendet, wobei ein Dalton (Da) numerisch dem Molekulargewicht in g/mol entspricht. Die Anwendungen reichen von ultrareinem Wasser für die Halbleiter- und Pharma-Industrie über die Entsalzung von Meerwasser für die Trinkwasserproduktion – derzeit realisiert in weltweit ca. 16.000 Anlagen mit einer Gesamtproduktion von über 95 Mio m<sup>3</sup>/d – bis hin zur erfolgreichen Reinigung von Industrieabwasser einschließlich hochkontaminierter Abwässer wie etwa Deponie-Sickerwasser. Der Betriebsdruck für die UO



(Quelle: Peters)

Bild 5: Grundsätzliches Wirkprinzip von Membranverfahren