Membrantechnik zur Schlammwasser-Aufbereitung – Grundlagen, Verfahrenskonzepte und Anwendungsbeispiele

Dipl.-Ing. Andreas Loi-Brügger
pdmp-Consulting – Beratung und Services zur Druckgetriebenen Membrantechnik
Weseler Str. 165, 46149 Oberhausen
Tel.: 0208 / 884 27 55
Fax: 0208 / 884 27 56
loi@pdmp-consulting.de

Einleitung

Membranen spielen bei vielen Stoffaustauschprozessen in der Natur - wie z. B. beim Stoffwechsel von lebenden Zellen oder bei der Wasseraufnahme von Pflanzen - eine zentrale Rolle. Sie haben die Eigenschaft, bestimmte Stoffe hervorragend passieren zu lassen und für andere Stoffe eine nahezu unüberwindbare Barriere darzustellen (siehe **Bild 1**).

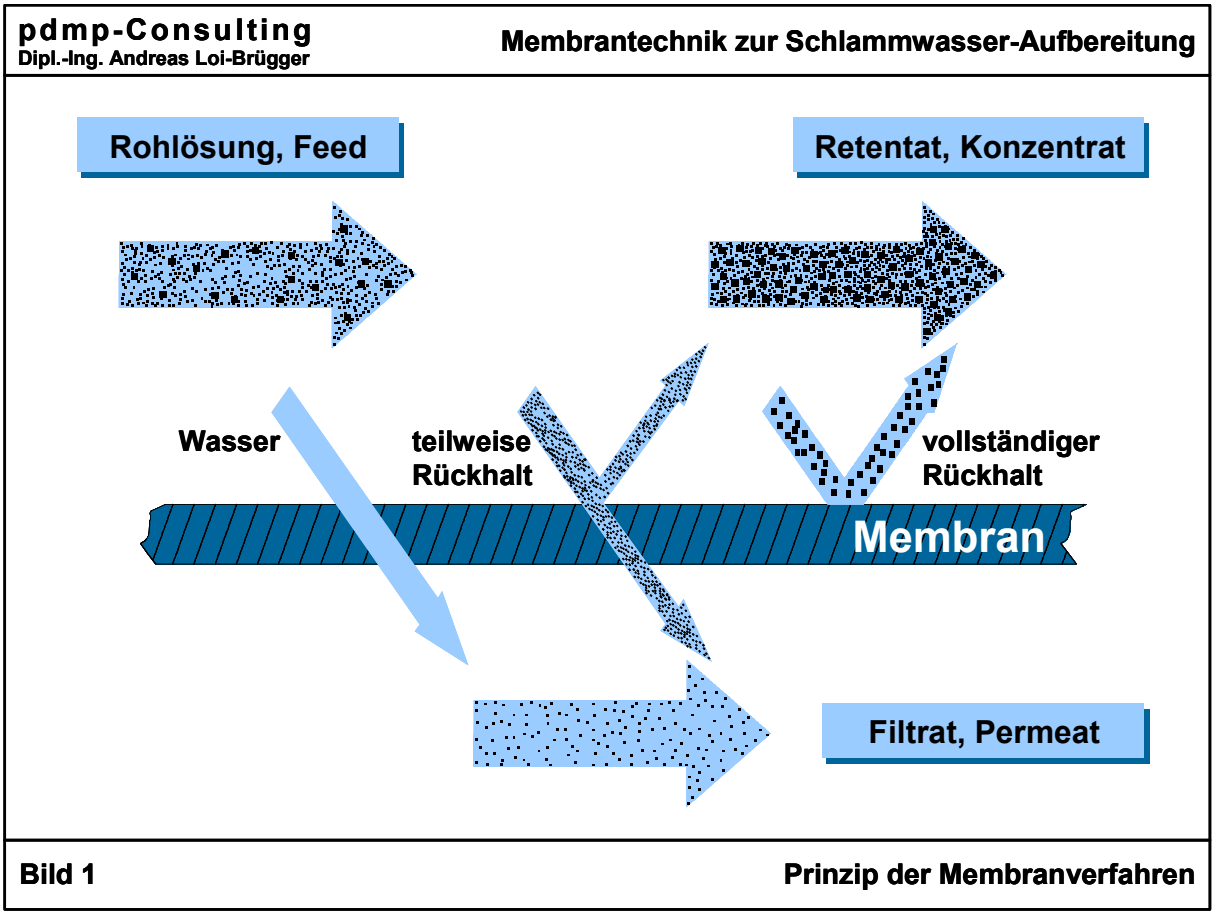

Bild 1 **Prinzip der Membranverfahren**

Durch die Herstellung synthetischer Membranen ist es gelungen, die Trenneigenschaften der Membranprozesse auch für technische Prozesse nutzbar zu machen. Typisch für alle Membranverfahren sind zwei Eigenschaften:

- Membranverfahren arbeiten rein physikalisch, d. h. die zu trennenden Komponenten werden weder thermisch noch chemisch oder biologisch verändert. Es entstehen somit keine unerwünschten Reaktionsprodukte.
- Membranverfahren sind modular aufgebaut und können damit an jede Kapazität angepasst werden.

In der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung kommen vorwiegend die druckgetriebenen Membranverfahren Ultra- und Mikrofiltration sowie Umkehrosmose und Nanofiltration zum Einsatz. Als Triebkraft für den Prozess wird eine Druckdifferenz von der Feed auf die Filtratseite aufgebaut. **Bild 2** zeigt den Größenbereich der Partikel bzw. Moleküle, die mit diesen Verfahren abgetrennt werden können.

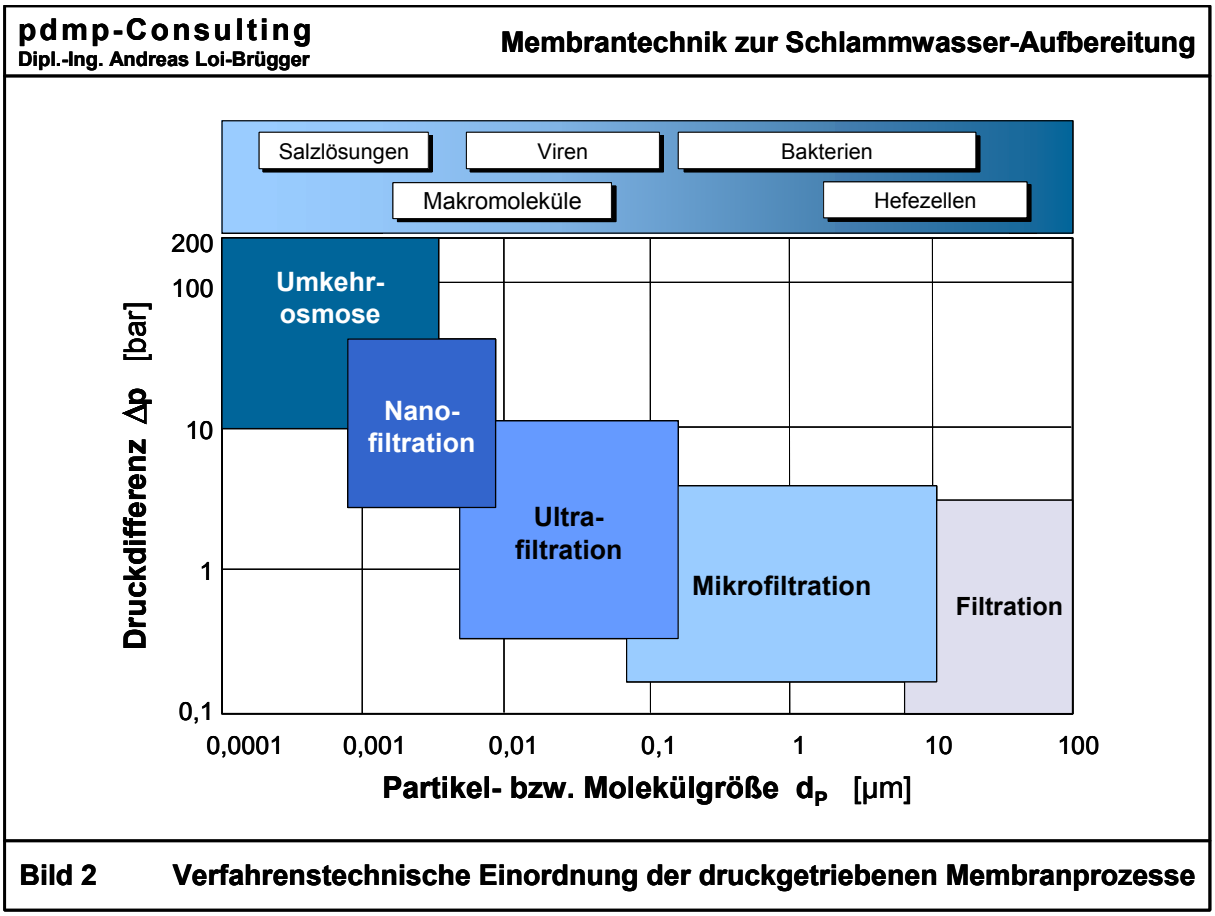

Bild 2 **Verfahrenstechnische Einordnung der druckgetriebenen Membranprozesse**

Weiterführende Literatur zum Thema Membrantechnik

Melin T, Rautenbach R: Membranverfahren – Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. Springer Verlag, 2. Auflage, 2003.

Wirkungsweise und Reinigungsleistung der Membranverfahren

Bild 3 zeigt exemplarisch an Hand der Ultrafiltration und Umkehrosmose die Reinigungsleistung der unterschiedlichen Membranverfahren. Bei der **Ultrafiltration** stellt die poröse Membran eine Barriere für alle partikulären und kolloidalen Bestandteile, Mikroorganismen und (bei geringer Porenweite) auch für Viren dar. Zurückgehalten wird damit auch der partikulär gebundene Anteil der AOX-Verbindungen. Der Trennmechanismus beruht auf Größenausschluss, d.h. Substanzen größer als die Poren der Membranen werden zurückgehalten. Es resultiert ein klares und keimfreies Filtrat mit Trübungswerten unter 0,1 FNU (in der Regel unter 0,01 FNU).

Eine Möglichkeit zur Entfernung von gelösten Stoffen bietet der Einsatz der **Umkehrosmose**. Das Wasser permeiert durch die "dichte" (d.h. weitestgehend porenfreie) Membran durch Lösung und Diffusion, während die in der Polymermatrix nicht löslichen Wasserinhaltstoffe im Retentat aufkonzentriert werden. Das Permeat weist in der Regel kaum noch gelöste Stoffe auf. Da Umkehrosmosemodule ein weitestgehend feststoffreies Zulaufwasser erfordern, bietet sich in Schwimmbad-Anwendungen die Kombination mit einer vorgeschalteten Ultrafiltration an.

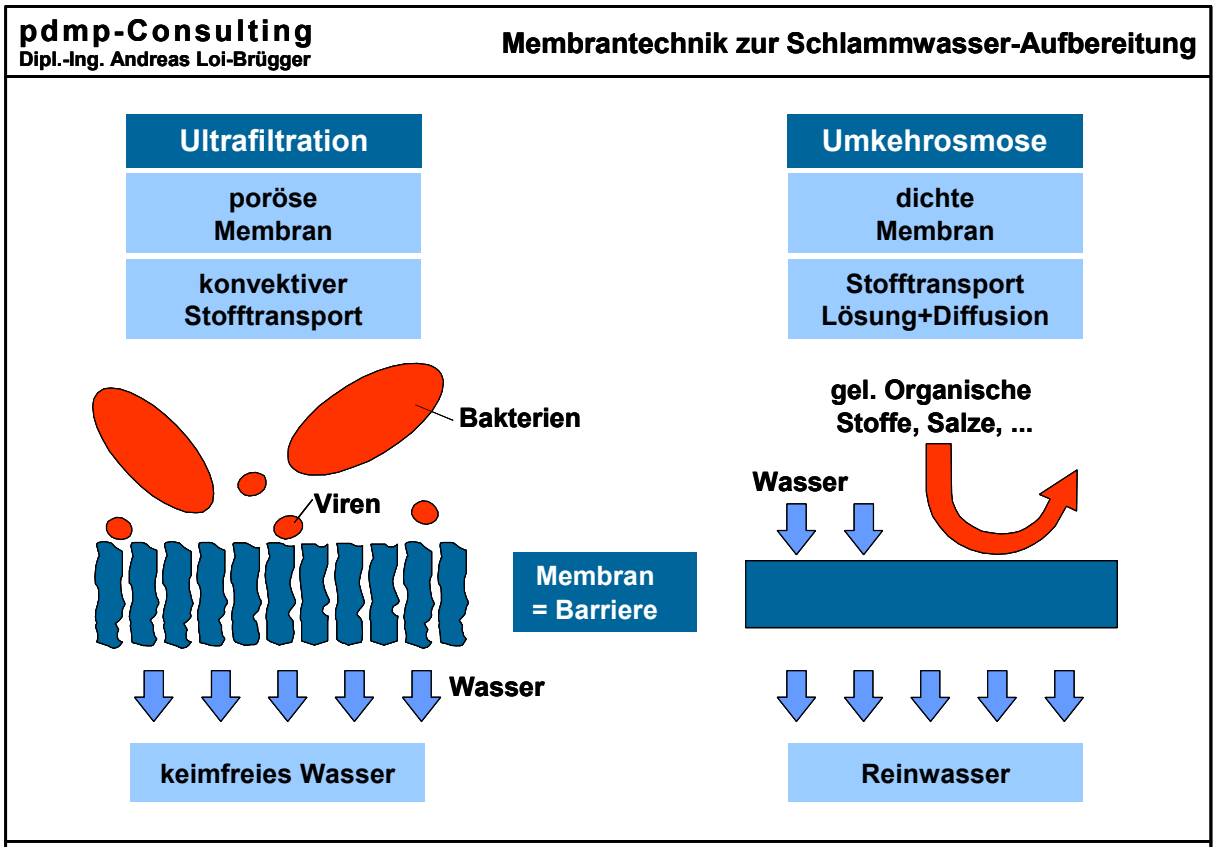

Bild 3 **Verfahrensprinzip und Aufbereitungs bei Ultrafiltration und Umkehrosmose**

Membranverfahren in Schwimmbädern

Das Rückhaltevermögen der verschiedenen Membranverfahren eröffnet interessante Möglichkeiten für den Einsatz im Wasserkreislauf von Schwimmbädern. Neben der Aufbereitung von Spülabwasser aus der Spülung der konventionellen Filter kommt die Membrantechnik zunehmend auch bei der Schwimmbeckenwasser-Aufbereitung zum Einsatz.

Der Einsatz der Ultrafiltration bei der **Schwimmbeckenwasser- Aufbereitung** sorgt nicht nur für eine sichere Entfernung von partikulären Stoffen und Krankheitserregern, sondern reduziert im Gegensatz zu konventionellen Verfahren in erheblichem Umfang auch die kolloidale Fracht im Filtratstrom. Dies bringt eine deutliche Verbesserung der Badewasserqualität mit sich. Dem stehen jedoch höhere spezifische Aufbereitungskosten gegenüber. Die überlegene Filtratqualität und die höheren spezifischen Kosten führen zur Reduzierung des Volumenstromes bei der Aufbereitung. Das bringt eine Neuausrichtung für den Wasserkreislauf im Schwimmbad mit sich. Möglichkeiten zur Teilstrombehandlung und zur weitergehenden Optimierung der Beckenhydraulik werden in diesem Zusammenhang derzeit diskutiert.

Ein aus wirtschaftlicher Sicht oftmals interessanter Ansatzpunkt für einen Einsatz der Membrantechnik sind die Teilströme, die mit einer Abwassergebühr beaufschlagt werden bzw. einen Energieaustrag darstellen. Da **Duschabwassser** einige Inhaltstoffe (Rückstände von Duschgelen und Shampoos) enthalten, die für viele Membranen ungünstig sind, wird die Aufbereitung von Duschabwasser in Schwimmbändern nicht weiter verfolgt. Die Aufbereitung des **Spülabwassers** wurde in den letzten Jahren sehr erfolgreich in zahlreichen Anlagen realisiert.

Ultrafiltrations- und Mikrofiltrationsmembranen

Bei Mikro- und Ultrafiltrationsmembranen handelt es sich ausschließlich um Porenmembranen. Porengröße und und Porengrößenverteilung bestimmen dabei die Lage des membrantypischen Trennschnitts. Der Trennschnitt wird bei **Mikrofiltrationsmembranen** mit dem nominellen Porendurchmesser angegeben. Die Porengröße von Mikrofiltrationsmembranen liegt im Mikrometerbereich (0,1 bis 10 µm). Da die Porengrößenverteilung von **Ultrafiltrationsmembranen** nur aufwändig oder nicht zu bestimmen sind, wird das Molekulargewicht einer zurückgehaltenen Komponente angegeben (molecular weight cut off, MWCO). Typische molekulare Trenngrenzen liegen zwischen 1000 und 200.000 D. Wichtig ist der Hinweis, dass diese Angaben kein absolutes Maß für die Trenneigenschaften der Membran sind, sondern vielmehr ein qualitative Hilfe für den Anwender bei der Membranauswahl darstellen.
Grundlegend für die Mikro- und Ultrafiltration bzgl. Anwendungen im Schwimmbad ist die Rückhaltung von Bakterien und Viren. Bei der Mikrofiltration bewirkt der Aufbau eines Filterkuchens und die Adsorption an größere Partikel einen deutlichen Rückhalt für Viren, obwohl die Membranporen einen Rückhalt nicht erwarten ließen (siehe **Bild 4**). Ein weitetegehender Rückhalt von Viren, vor allem in besonderen Belastungsfällen, erfordert allerdings die Verwendung von Ultrafiltrationsmembranen.

Für die Mikrofiltration und die Ultrafiltration stehen neben polymeren Membranwerkstoffen Keramikmembranen zur Verfügung. Ein wesentlicher Vorteil der Keramik gegenüber Polymeren Werkstoffen in Schwimmbad-Anwendungen ist die mechanische und chemische Beständigkeit. Während bei Modulen mit Polymermembranen Faserbrüche auftreten können, womit die Modulintegrität verloren geht, ist Membranbruch bei Keramikmodulen unwahrscheinlich.

pdmp-Consulting
Dipl.-Ing. Andreas Loi-Brügger

Membrantechnik zur Schlammwasser-Aufbereitung

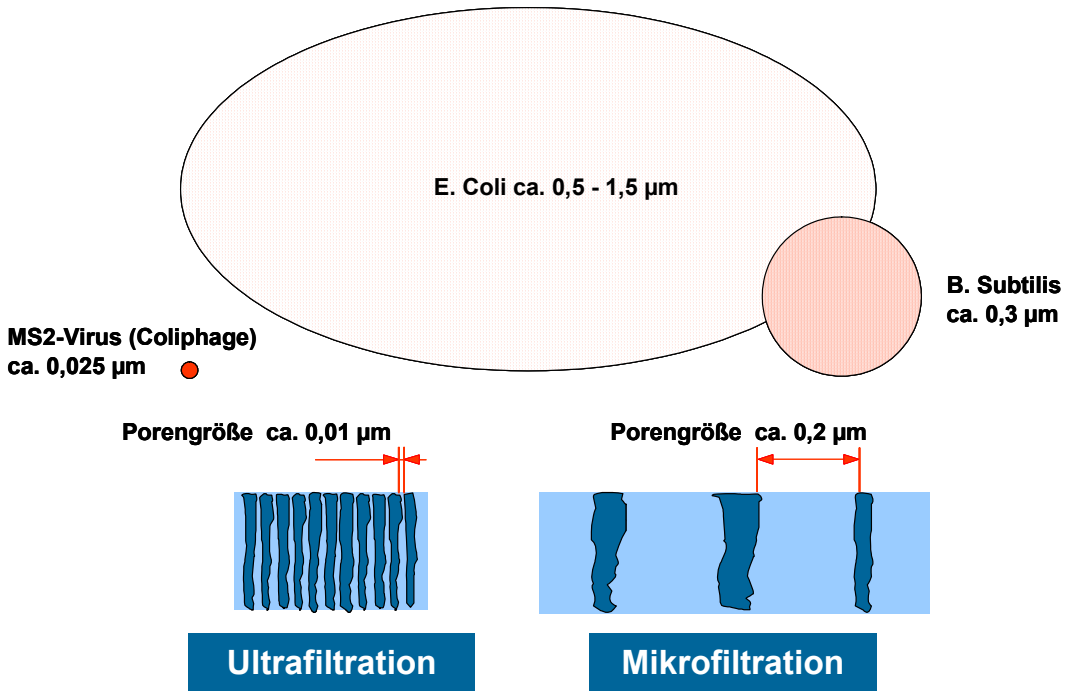

Bild 4 **Einsatz der UF und MF als Hygiene-Barriere**

Umkehrosmose und Nanofiltration

Bei Umkehrosmose und Nanofiltration kommen verschiedene Wirkmechanismen zum Einsatz, die entsprechend **Bild 5** unterschiedliche Rückhalteraten für gelöste Substanzen mit sich bringen. Bei der **Nanofiltration** sorgen extrem kleine Poren in Verbindung mit der elektrischen Ladung der Membranoberfläche für einen hohen Rückhalt von Metallionen, zweiwertigen Ionen und Molekülen oberhalb von 200 g/mol. Je nach eingesetzter Membran können auch einwertige Salze bereits in spürbarem Maß aufkonzentriert werden.

Der Stofftransport bei der **Umkehrosmose** durch die nahezu porenfreie Membran geschieht durch Lösung in der Polymermatrix und Diffusion durch die aktive Schicht der Membran. Der Lösungs-Diffusions-Stofftransport bringt einen erheblichen Flusswiderstand mit sich, der durch Drücke von deutlich über 10 bar überwunden werden muss. Der Trennmechanismus ermöglicht dabei eine hohe Rückhaltung aller Salze und von organischen Substanzen oberhalb eines Molgewichtes von 100 g/mol. Sollte der Rückhalt für kleinere organische Moleküle nicht ausreichen, kann eine Verfahrensstufe hinter der Umkehrosmose gezielt diese Stoffe entfernen (z. B. Aktivkohle, Ozonung).

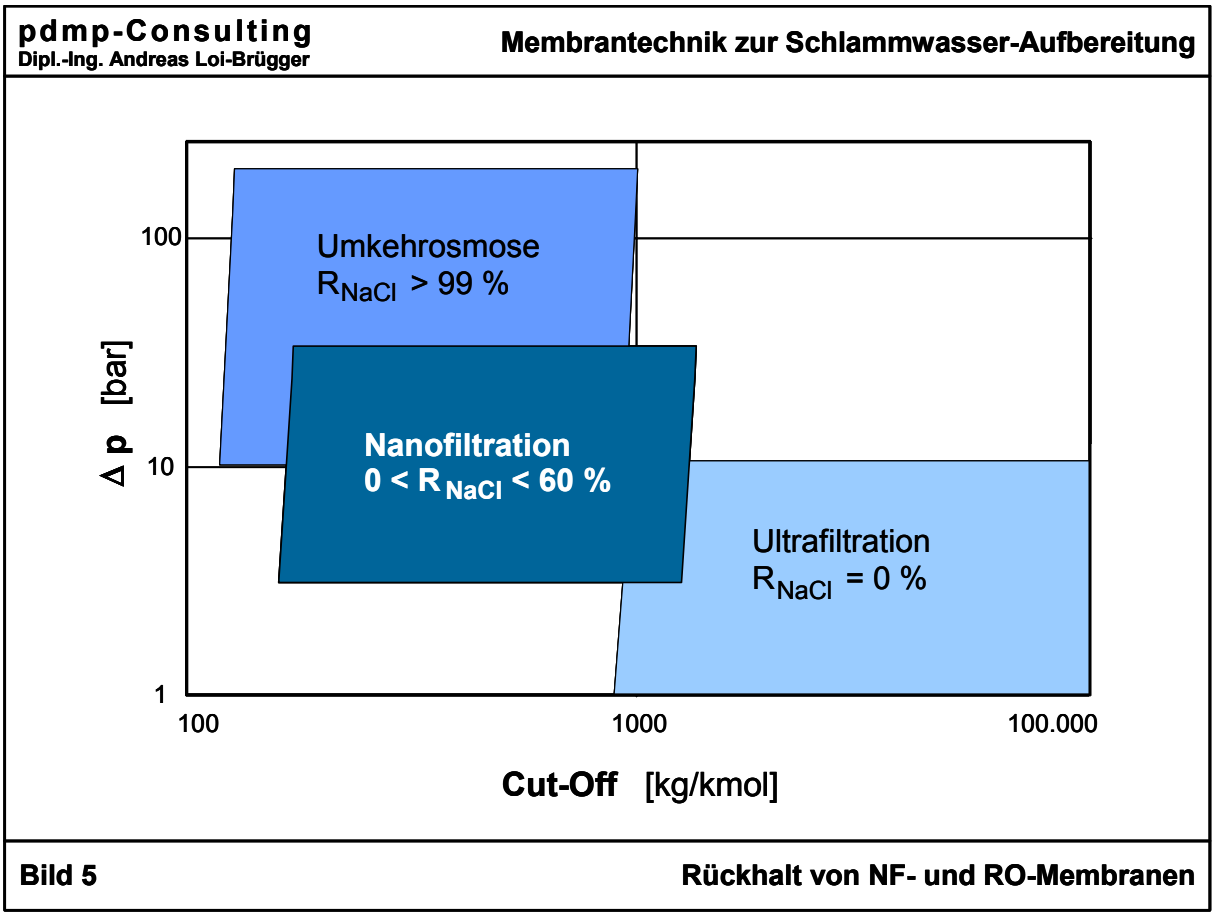

Bild 5 **Rückhalt von NF- und RO-Membranen**

Betriebsweisen

Zentrales Problem bei der Membranfiltration ist die Gewährleistung eines hohen Permeatflusses. Dem stehen verschiedene Verschmutzungseffekte entgegen. Beim **Fouling** verursachen Agglomerationen von Wasserinhaltstoffen, auf der Membran adsorbierende Substanzen, porenverblockende Stoffe oder Biofouling für einen erhöhten Strömungswiderstand. Beim **Scaling** führt die Aufkonzentrierung von Salzen über die Löslichkeitsgrenze hinaus zu Ausfällungen auf der Membran. Zur Eindämmung der Fouling- und Scalingproblematik kommen je nach Anwendung Flockungs-

mittel und Antiscalants zum Einsatz. Aufgabe der Prozessführung ist es, die Permeatflussabnahme mit möglichst geringem Aufwand, jedoch mit hoher Betriebssicherheit zu reduzieren.

Bei Membrananwendungen im Schwimmbad kommen der statische Betrieb (Dead-End-Filtration) und der dynamische Betrieb (Cross-Flow-Filtration) zum Einsatz. Im **Dead-End-Betrieb** wird die Membran vom gesamten zu filtrierenden Medium durchströmt. Alle zurückgehaltenen Teilchen lagern sich auf der Membran ab. Die zeitlich anwachsende Deckschicht bringt eine verringerte Durchlässigkeit mit sich, die durch eine Druckerhöhung kompensiert wird. Nach einem Filtrationsintervall wird das Modul gespült, d.h. die auf der Membran abgelagerten Stoffe werden entfernt und aus dem Modul ausgetragen. Vorteil des Dead-End-Betriebs ist dessen geringer spezifischer Energiebedarf von 0,2 bis 0,5 $kWh/m^3_{Permeat}$. Der Dead-End-Betrieb kommt ausschließlich im Zusammenhang mit der Ultra- und Mikrofiltration zum Einsatz.

Der **Cross-Flow-Betrieb** realisiert eine kontinuierliche membranparallele Überströmung; nur ein Teilstrom passiert die Membran. Auch beim Cross-Flow-Betrieb können sich Partikel als Deckschicht auf der Membran ablagern. Aufgabe der Membranüberströmung ist unter anderem die Kontrolle der Deckschichtbildung. Nachteil des Cross-Flow-Betrieb ist der höhere Energiebedarf, der für die Membranüberströmung erforderlich ist. Ein wesentlicher Vorteil ist der eine hohe Betriebssicherheit.

Membrananlagen zur Spülabwasser-Aufbereitung

Die ersten Membrananlagen zur Aufbereitung von schlammhaltigem Wasser aus der Filterspülung in Schwimmbädern wurden 1997 errichtet. Seitdem wurden ca. 150 Anlagen realisiert. Dabei bereitet die Mehrzahl der Anlagen das Spülabwasser zur Wiederverwendung als Füllwasser auf. Abhängig von den Randbedingungen kann aber auch eine weniger aufwändige Aufbereitung auf Reinigungswasser- oder Einleitqualität sinnvoll sein. Ziel beim Einsatz der Membrantechnik zur Spülabwasseraufbereitung ist die Senkung der Betriebskosten. Für die Spülabwasseraufbereitung zu Füllwasser stehen verschiedene Anlagenkonzepte zur Auswahl. Im Folgenden werden einzelne technische Gesichtspunkte und die wichtigsten Anlagenkonzepte für die Spülabwasseraufbereitung mit Membrantechniken vorgestellt. Abschließend wird aus technologischer Sicht auf die Forderungen und mögliche Konzepte entsprechend der für das II. Quartal zu erwartenden DIN 19645 zur Aufbereitung von Spülabwasser aus der Beckenwasseraufbereitung eingegangen.

Aufbereitung und weitere Verwendung von Spülabwasser

Abhängig von den wirtschaftlichen Randbedingungen des Schwimmbades können mit einer Anlage zur Schlammwasseraufbereitung Kosten für Trinkwasser, Energie und Abwasserentsorgung reduziert werden. Bei der Aufbereitung des Abwassers mit Membrantechnik muss in jedem Fall die Frage nach der Verwendung des anfallenden Betriebswassers gestellt werden.

- Da der größte Kostenanteil in der Regel durch die Abwasserabgabe verursacht wird, geht ein erster Ansatz zunächst von der Zielsetzung aus, die Abwasserkosten zu senken, indem beispielsweise die Wasserqualität soweit verbessert wird, dass eine Verwendung als Wasser zu Reinigungs- oder Bewässerungszwecken (Betriebswasser Typ 2) oder eine Direkteinleitung in ein Oberflächengewässer (Betriebswasser Typ 3) möglich wird. Werden dabei keine zusätzlichen Maßnahmen zur Energierückgewinnung getroffen, so geht der Energieanteil des ausgeschleusten Spülabwassers verloren.

- Neben der Reduktion der Abwasserkosten bietet die Membrantechnik jedoch auch die Möglichkeit, die Kosten für Füllwasser und Energie zu senken. Dies geschieht, indem das Wasser soweit aufbereitet wird, dass es als Füllwasser in den Kreislauf des Schwimmbades zurückgeführt werden kann (Betriebswasser Typ 1). In diesem Fall sind jedoch höhere Anforderungen an die Aufbereitungstechnik zu stellen als im Fall der reinen Abwasserbehandlung.

Reinigungs-Leistung der Membranverfahren

Die für die Spülabwasseraufbereitung zu erwartende Reinigungs-Leistung der unterschiedlichen Membranverfahren wird in **Bild 6** dargestellt. Die **Ultrafiltration** wirkt als Barriere für alle Feststoffe, Mikroorganismen und partikulären Bestandteile des Spülabwassers. Dazu zählt auch der partikulär gebundene Anteil der AOX-Verbindungen. Dieser beträgt etwa 75 % des Gesamt-AOX-Gehaltes im Spülabwasser.

Eine Möglichkeit zur Entfernung von gelösten Stoffen, z. B. Desinfektionsnebenprodukten, bietet der Einsatz von Aktivkohlefiltern. Dadurch können jedoch nur adsorbierbare Stoffe aus dem Wasser entfernt werden. Unbefriedigend bleibt der Rückhalt von Salzen und von anderen nicht adsorbierbaren Verbindungen. Der Einsatz der **Umkehrosmose** zur Entfernung gelöster Wasserinhaltstoffe verspricht eine Lösung des Problems.

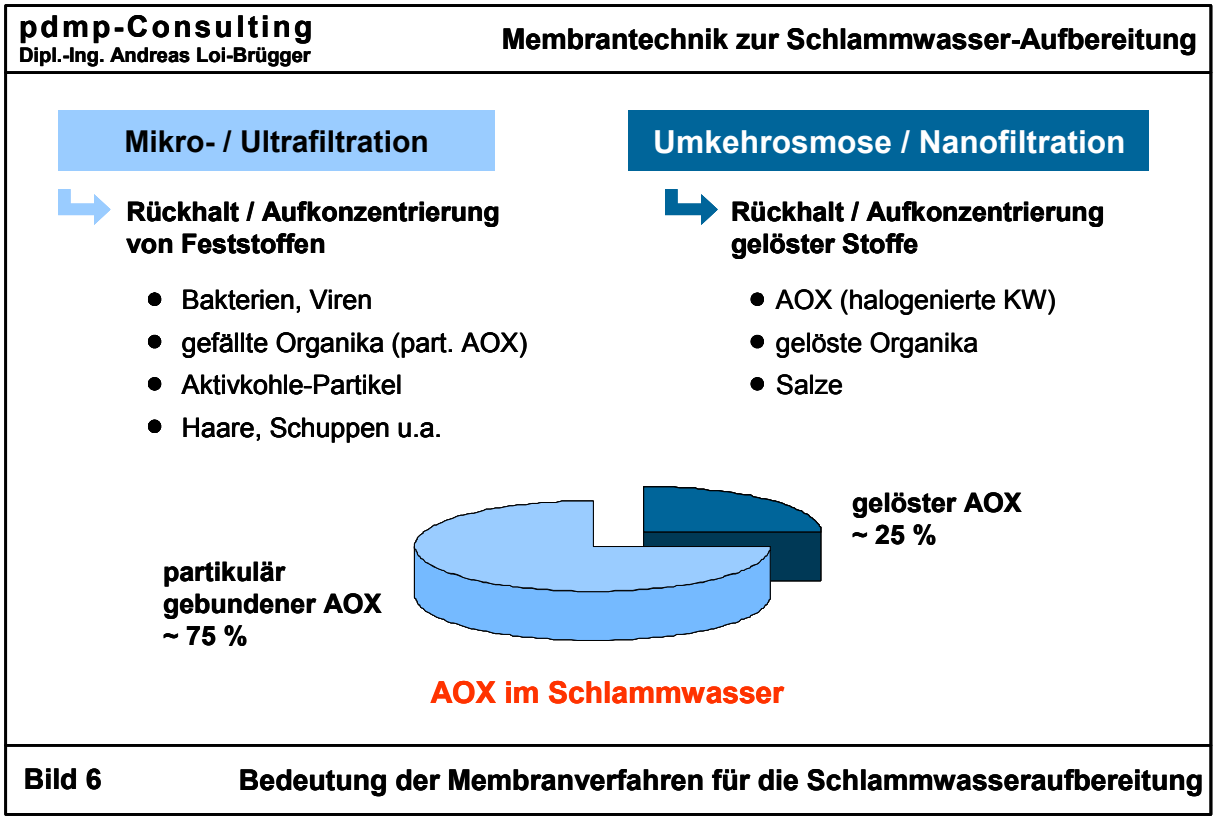

Bild 6 **Bedeutung der Membranverfahren für die Schlammwasseraufbereitung**

Die Bedeutung der Entfernung gelöster Inhaltstoffe wird in **Bild 7** verdeutlicht. Beim Eintrag gelöster Stoffe in das Schwimmbeckenwasser muss unterschieden werden zwischen extern mit dem zugeführten Füllwasser eingetragenen und intern im Schwimmbadbetrieb eingetragenen oder entstehenden Stoffen. Der intern eingetragene Anteil ergibt sich aus den Chemikalien-Zusätzen für die pH-Wert-Einstellung, die Flockung und die Desinfektion des Beckenwassers (z. B. Aluminium, Eisen, Chlorid, Sulfat) sowie aus allen Stoffen, die durch den Menschen eingetragen oder im Beckenwasser-Kreislauf gebildet werden (z. B. THM, AOX, Nitrat).

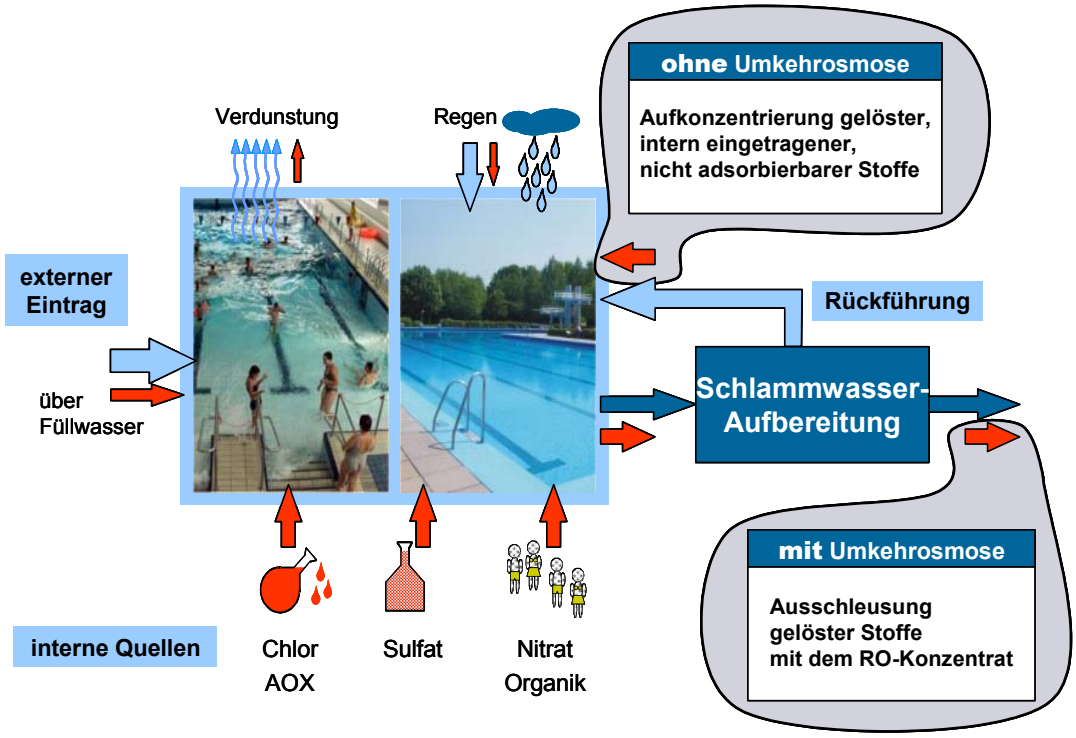

Bild 7 **Bedeutung der Umkehrosmose für die Rückführung als Füllwasser**

Die komplette Fracht aller in den Wasserkreislauf Schwimmbad eingetragenen Stoffe muss über das Abwasser ausgetragen werden. Jede Reduktion der Abwassermenge mit dem Ziel, Füllwasser einzusparen - egal ob dies über eine Abwasseraufbereitung und anschließende Rückführung oder über wassersparende Maßnahmen bei der Filterspülung erreicht wird - hat daher folgende Konsequenzen:

- Durch die reduzierte Füllwasserzugabe sinkt die Fracht an extern eingetragenen Wasserinhaltstoffen. Die Bilanz dieser Stoffe bleibt also für das Schwimmbad gleich.
- Da die intern eingetragene Fracht von einer Reduzierung des Füllwassers unbeeinflusst bleibt, muss diese aufgrund der Abwasserreduktion über einen geringeren Konzentratstrom abgeführt werden. Im stationären Betrieb müssen daher alle intern eingetragenen oder entstehenden Inhaltstoffe mit höherer Konzentration abgeführt werden.

Wird diese Aufkonzentrierung nicht durch die Beckenwasser- bzw. Abwasser- Aufbereitung gewährleistet, so findet sie zwangsläufig im Beckenwasser statt. Werden beispielsweise 80 % des Abwassers aufbereitet und als Füllwasserersatz zurückgeführt, so werden sich alle Stoffe, die aus internen Quellen stammen und nicht über die Abwasseraufbereitung zurückgehalten werden, um den Faktor 5 im Beckenwasser aufkonzentrieren. Daher ist bei der Aufbereitung des Spülabwassers eine hohe Eliminationsrate in der Regel auch für alle relevanten gelösten Stoffe zu fordern. Diese Forderung kann derzeit vor allem durch das Verfahren der Umkehrosmose erfüllt werden.

Beurteilungskriterien von Membrananlagen

Der Entscheidung für eines der am Markt angebotenen Konzepte zur Spülabwasseraufbereitung sollte die Überlegung vorausgehen, welche Randbedingungen im Bad

vorliegen und welches Konzept diesen am günstigsten Rechnung trägt. Besonderes Augenmerk sollte daneben auf die Ausführung der wichtigsten Prozessschritte gelegt werden, die letztendlich über die Aufbereitungsqualität, Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit der Anwendung entscheiden. In jedem Fall werden zentrale Verfahrensschritte in den Konzepten zur Spülabwasseraufbereitung mit Membrantechnik realisiert.

Eines der wichtigsten Kriterien ist die Permeat- bzw. Filtratqualität. Die Auswahl geeigneter Membranen und die Sicherstellung und Überwachung der Modulintegrität stellen deshalb die zentralen Punkte bei der Konzeptionierung der Anlagen dar. Bei Membran- und Modulauswahl ist auf ausreichende chemische wie mechanische Beständigkeit zu achten, um den Verlust an Rückhalt der Membran bzw. Membranbrüche zu vermeiden.

Die Affinität der Membran entscheidet über das Verschmutzungsverhalten der Membran und damit über das Betriebsverhalten der Anlage. Bei der Modulkonstruktion interessieren außerdem Spülbarkeit und Packungsdichte. Das Verschmutzungsverhalten von Membran und Modul beeinflusst direkt den notwendigen Einsatz von Energie und Chemikalien zur Kontrolle bzw. Entfernung der Verschmutzungen. Energiebedarf und Chemikalienverbrauch gehen direkt in die Betriebskosten ein.

Der Permeatfluss bedingt die für eine geforderte Anlagenkapazität notwendige Membranfläche. Dabei muss der Permeatfluss um den Rückspülfaktor nach unten korrigiert werden, es ergibt sich der Netto-Permeatfluss. Der Nettofluss beeinflusst mit dem Membranflächenbedarf die Investitionskosten und die Kosten für den Membranersatz. Die Ausbeute bestimmt im Wesentlichen die Kosten für die Konzentratbehandlung bzw. -entsorgung.

Die Anlagenverfügbarkeit berücksichtigt jegliche Ausfälle beim Anlagenbetrieb. Dazu zählen beispielsweise Ausfallzeiten für Wartung oder bei Störung des Anlagenbetriebs. Die Anlagenverfügbarkeit für ein bestimmtes Konzept ist in der Regel schwierig zu ermitteln. Hier sind Erfahrungswerte anderer Betreiber heranzuziehen und auf solide Anlagenkonzepte unter Verwendung bewährter Komponenten zu achten. Ein wichtiges Kriterium für die Wirtschaftlichkeit ist die Auslastung der Anlage. Sinnvoll ist es, durch entsprechende Maßnahmen im Vorfeld (Pufferbecken) einen vergleichmäßigten Betrieb unter Verringerung der Kapazität der Anlage zu ermöglichen.

Prozessdesign zur Spülabwasseraufbereitung

Ein Großteil der Feststoffe im Spülabwasser sind geflockte und gefällte Stoffe aus der Beckenwasseraufbereitung. Diese haben in der Regel ein sehr gutes Sedimentationsverhalten, so dass sich als erster Verfahrensschritt zur Spülabwasser-Aufbereitung eine Sedimentation anbietet. Aus dem Spülabwasserbehälter wird der Klarüberstand mittels einer schwimmenden Absaugung abgezogen. Um eventuell aufschwimmende Grobstoffe, die zu einer Verblockung der Membrananlage führen könnten, zu entfernen, folgt als nächster Schritt eine Vorfiltration.

Der folgende Trennschritt hat in der Regel die Entfernung schlecht sedimentierbarer partikulärer Verunreinigungen zum Ziel. Bei vielen Verfahrenskonzepten erfolgt dies durch den Einsatz der Ultrafiltration. Gelöste Wasserinhaltstoffe werden in der Regel durch die Anwendung "dichter" Membranen, d.h. Umkehrosmose- oder Nanofiltrationsmembranen abgetrennt. Bisher wurde dabei nur ein Teilstrom der Umkehrosmose zugeführt. Die Bemessung des Teilstroms ist abhängig von Wasseranalysen im Spülabwasser und Badebeckenwasser, ein typischer Wert ist 70 %. In Einzelfällen ist allerdings auch eine vollständige Aufbereitung über die Umkehrosmose notwendig.

Da Chlor die im Schwimmbad angewendeten Umkehrosmosemembranen stark angreift, ist im Zulauf zur Umkehrosmose in jedem Fall eine Entchlorung vorzusehen. Eine Möglichkeit ist der Einsatz von Aktivkohle. Die Aktivkohle eignet sich darüber hinaus zur Entfernung organischer Moleküle mit einem Molgewicht unterhalb 150 g/mol, die von der Umkehrosmose nur zu einem geringen Teil zurückgehalten werden. Deshalb kann die Anwendung von Aktivkohle auch im Ablauf der Umkehrosmose sinnvoll sein. Eine weitere wichtige Aufgabe kommt der Aktivkohle mit der AOX-Reduktion bei der Aufbereitung von Abwässern aus der Spülabwasseraufbereitung (RO-Konzentrat, Klarwasser aus der Schlammeindickung) zu.

Vor der Wiederverwendung des Wassers ist eine nachgeschaltete Desinfektionsstufe sinnvoll. Selbst wenn eine Aufbereitungsanlage ein keimfreies Wasser produziert, so besteht in den nachfolgenden Anlagenteilen (Rohrleitungen, Behälter etc.) auf Grund der für das Wachstum von Mikroorganismen extrem günstigen Temperatur-Bedingungen eine Verkeimungsgefahr. Die Erfahrungen zeigen, dass bereits durch eine geringe Chlordosierung das Verkeimungsproblem vermieden werden kann. Daneben dient die Desinfektionsstufe (Chlordosierung oder UV-Behandlung) bei Teilstromaufbereitung mit der Umkehrosmose als zusätzliche Sicherheitsstufe, da hier ein Teil des Wassers lediglich eine Hygiene-Barriere passiert hat. Die UV-Behandlung kann darüber hinaus im Zulauf zur Umkehrosmose zum Einsatz kommen, um eine Verblockung der Module durch Biofouling auszuschließen.

Die Umkehrosmose bewirkt neben der erwünschten Aufbereitungsleistung auch die Entfernung der Härtebildner. Um Korrosion zu vermeiden und eine gute Flockung bei der Badebeckenwasseraufbereitung zu gewährleisten, ist abhängig von der Wasserhärte des als Füllwasser genutzten Trinkwassers ggf. eine Aufhärtungsstufe notwendig. Die Aufhärtung kann grundsätzlich im Ablauf der Spülabwasseraufbereitung oder im Beckenwasserkreislauf durchgeführt werden.

Die Gesamtausbeute der Anlagen beträgt in der Regel zwischen 70 und 85 %. Damit fällt ca. ¼ des aufzubereitenden Spülabwassers an verschiedenen Stellen im Prozess als Abwasser an. Der Dünnschlamm aus dem Spülabwasserbehälter ist nach eventueller Zwischenlagerung oder Eindickung durch Zentrifugen, Kammerfilterpressen oder sogenannter Dry-Bags zu entsorgen. In der Regel sollte dabei eine Kapazität zur Schlammspeicherung von ca. 6 Monaten vorgesehen werden, da ansonsten die Transportkosten häufig zu hoch werden. Das bei der Eindickung anfallende Abwasser sowie die Konzentrate aus der Umkehrosmose werden nach eventueller Aktivkohleadsorption abgeleitet. Konzentrate aus der Ultrafiltration werden entweder in den Spülabwasserspeicher zurückgeführt oder als Abwasser in die Kanalisation abgeleitet.

Kommerzielle Anlagenkonzepte

Im Folgenden werden vier Anlagenkonzepte vorgestellt, welche den wichtigsten Teil der bisher kommerziell erhältlichen Anlagen widerspiegeln.

In **Bild 8** ist das **Konzept 1** dargestellt, welches auf dem Einsatz einer Cross-Flow-Ultrafiltration und einer Teilstrom-Umkehrosmose beruht. Der spezifische Energiebedarf wird bei diesem Konzept mit ca. 2,2 $kWh/m^3_{Füllwasser}$ angegeben. Die Ultrafiltration wird mit einer keramischen Membran mit einem Cut-off von ca. 200 kD realisiert. Der Vorteil liegt in einer minimierten Wahrscheinlichkeit von Membranbruch, was auf der chemischen und mechanischen Beständigkeit der Membranen beruht. Dies drückt sich auch in einer hohen Lebenserwartung der Membranmodule aus.

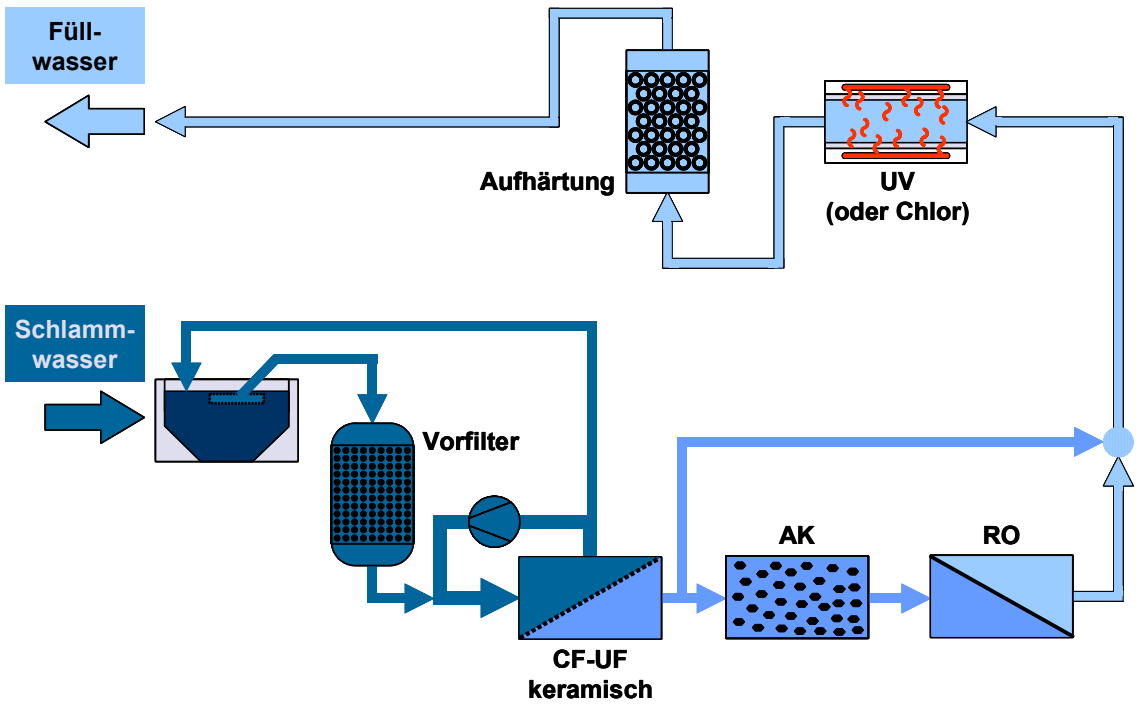

Bild 8 **Schlammwasseraufbereitung zu Füllwasser – Konzept 1**

Die Membranen werden in Intervallen mit Chlor desinfiziert, was die filtratseitige Verkeimung reduziert und somit das Biofouling-Risiko für die Umkehrosmose vermindert. Zur Entfernung des freien Chlors kommt vor der Umkehrosmose Aktivkohle zum Einsatz. Das Mischwasser aus UF-Filtrat und RO-Permeat wird vor der Einspeisung in den Schwallwasserbehälter durch UV-Behandlung oder Chlordosierung desinfiziert und abschließend je nach Bedarf aufgehärtet.

Ein von mehreren Herstellern verfolgtes Anlagenkonzept ist in **Bild 9** dargestellt. Das **Konzept 2** beruht auf der Kombination aus Dead-End-Ultrafiltration und Teilstrom-Umkehrosmose. Der spezifische Energiebedarf liegt für dieses Konzept mit Dead-End-UF mit ca. 1 kWh/m³$_{Füllwasser}$ niedriger als bei Konzept 2. Bei der Ultrafiltration kommen Kapillarmodule nach dem Einzelfaser- oder dem Mehrkanalfaser-Prinzip zum Einsatz, dabei haben die Membranen einen Cut-off von ca. 100-150 kD. Mehrkanalfaser-Membranen haben eine höhere mechanische Belastbarkeit, was bei den in der Dead-End-Filtration eingesetzten Spülprozessen von Vorteil sein kann, um Faserbrüche zu vermeiden. Im Zulauf zur Umkehrosmose erfolgen eine Aktivkohleadsorption zur Chlorentfernung und gegebenenfalls eine UV-Behandlung zur Minimierung des Biofoulingpotentials. Das Mischwasser aus Filtrat und Permeat wird nach einer eventuellen Aufhärtung und Chlordesinfektion dem Schwallwasserbehälter zugeführt.

Bild 10 zeigt das **Konzept 3**, welches als zentrale Aufbereitungsstufe die Nanofiltration einsetzt. Zuvor wird durch eine Kombination aus Hydrozyklon, Plattenabscheider und Mehrschichtfiltration eine weitestgehende Entfernung partikulärer Bestandteile des Spülabwassers erreicht. Der Einsatz nur einer Membranstufe bringt einen niedrigen spezifischen Energiebedarf von ca. 0,5 kWh/m³$_{Füllwasser}$ mit sich. Da die Nanofiltration einwertige Ionen zum Großteil passieren lässt, kann mit diesem Konzept ohne weitere Probleme auch Spülabwasser aus Schwimmbädern mit Natriumchlorid-Sole-Becken aufbereitet werden. Da zweiwertige Ionen und somit insbesondere die Härtebildner von der Nanofiltration zurückgehalten werden, ist in diesem

Konzept wie in den vorigen eine eventuelle Aufhärtung vorgesehen. Vor der Einspeisung als Füllwasser wird das Permeat durch Chlordosierung desinfiziert.

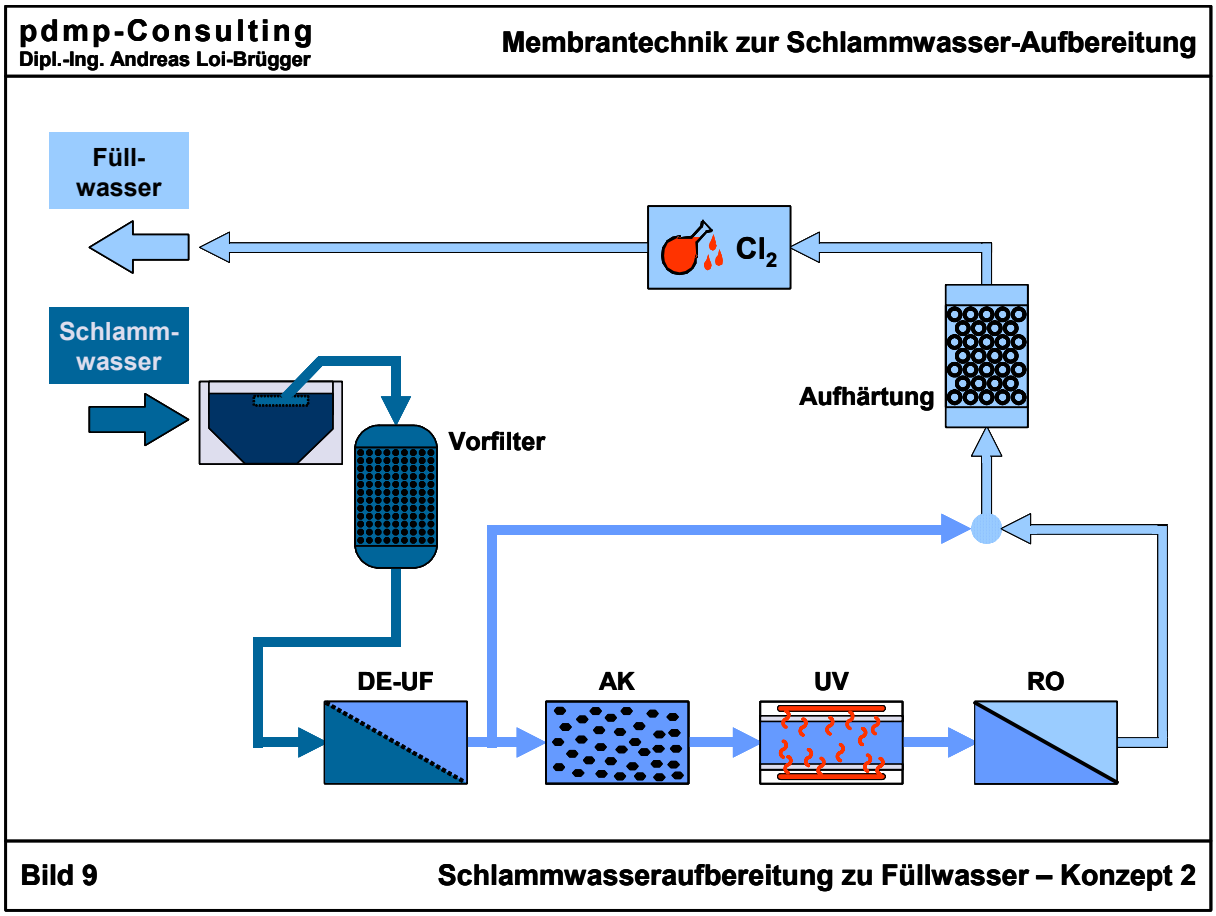

Bild 9 **Schlammwasseraufbereitung zu Füllwasser – Konzept 2**

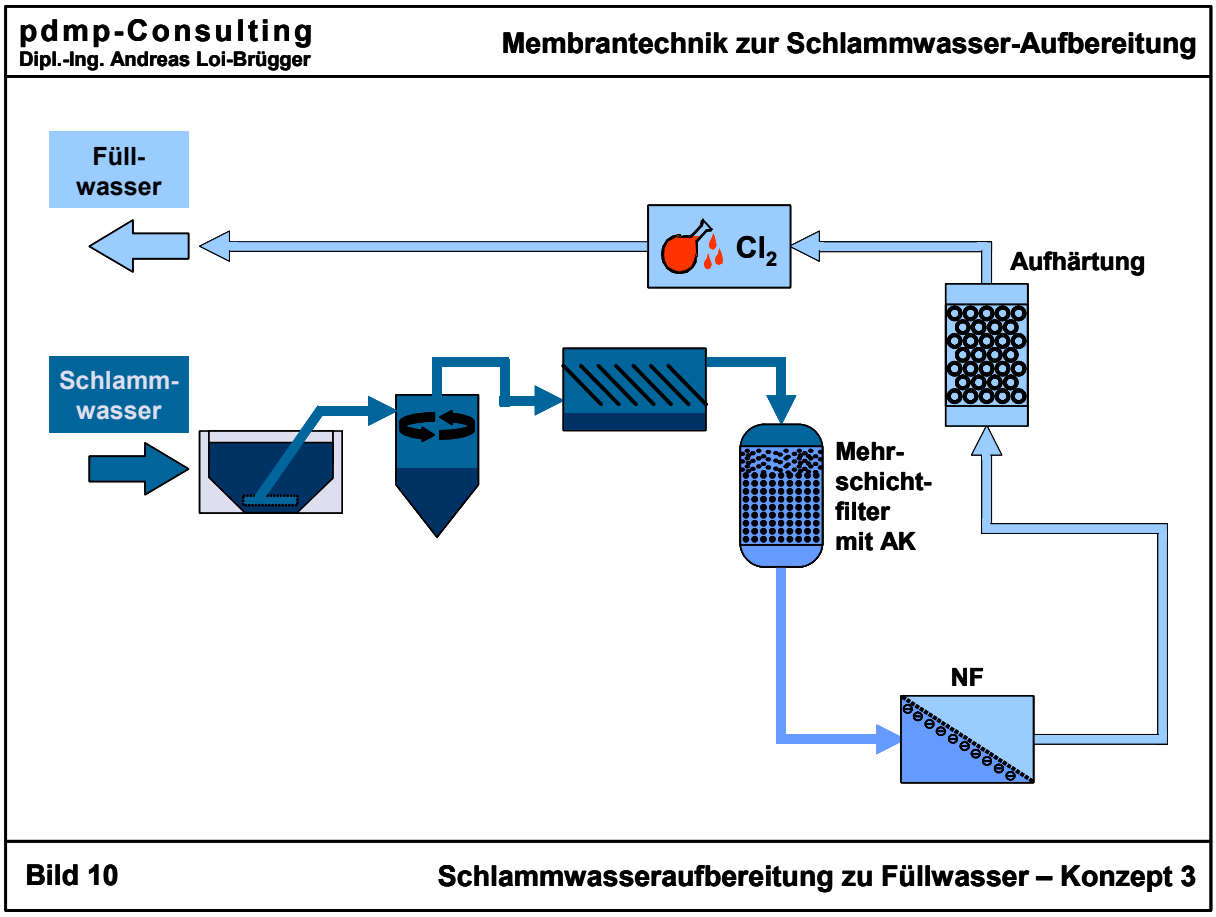

Bild 10 **Schlammwasseraufbereitung zu Füllwasser – Konzept 3**

Das in **Bild 11** dargestellte **Konzept 4** verfolgt die konsequente Aufbereitung des Spülabwassers mit zweifacher hygienischer Barriere durch den Einsatz einer Cross-Flow-Ultrafiltration in Verbindung mit einer Vollstrom-Umkehrosmose. Auf Grund der Kombination von zwei Cross-Flow-Anwendungen für den kompletten Wasserstrom liegt hier der spezifische Energiebedarf bei ca. 2,8 kWh/$m^3_{Füllwasser}$. Nach der Entnahme des Wassers aus dem Schlammbehälter und einer Vorfiltration wird das Wasser zunächst durch Chemikalienzugabe entchlort. Die Membranen in der anschließenden Ultrafiltrationseinheit haben einen Cut-off von ca. 100 kD. Das Filtrat wird danach direkt von der Umkehrosmose weiter aufbereitet. Da in diesem Prozess organische Substanzen unterhalb 150 g/mol nur eingeschränkt zurückgehalten werden, wird das Permeat der Umkehrosmose mit Aktivkohle weiter aufbereitet. Diesem Schritt folgt abschließend eine Transportchlorung. Eine eventuell notwendige Aufhärtung, die bei diesem Konzept am ehesten wahrscheinlich wird, da der gesamte Wasserstrom über die Umkehrosmose geführt wird, ist außerhalb der Anlage vorzunehmen. Das kann entweder vor der Einspeisung des aufbereiteten Wassers oder im Badewasserkreislauf geschehen.

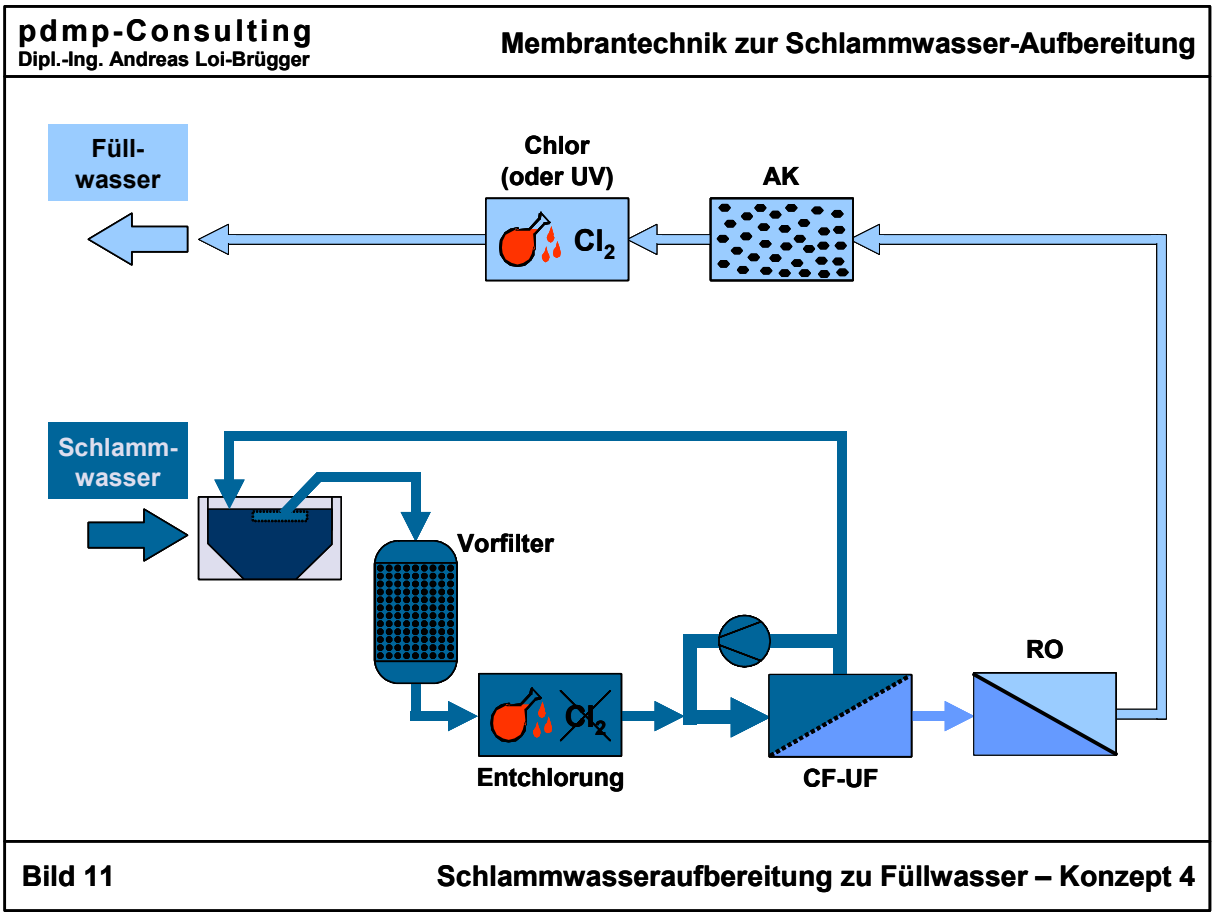

Bild 11 **Schlammwasseraufbereitung zu Füllwasser – Konzept 4**

Umsetzung der DIN 19645

In der DIN 19645 (Veröffentlichung voraussichtlich im II. Quartal 2006) werden drei Typen von Betriebswässern definiert und Angaben zur jeweils notwendigen Aufbereitung gemacht: Füllwaser (Typ1), Wasser zur Beregnung, Flächenreinigung und Toilettenspülung (Typ2) sowie Wasser zur Direkteinleitung in ein Gewässer (Typ3). Diese Betriebswassertypen dürfen lediglich aus Abwasser aus der Spülung der Filter zur Schwimm- und Badebeckenwasseraufbereitung erzeugt werden. Die Forderungen der DIN 19645 beruhen auf der Grundlage, dass mit dem Einsatz der Betriebswässer eine **Gesundheitsgefährdung der Badegäste oder des Betriebspersonals unter allen Umständen zu vermeiden** ist.

Wie in den vorherigen Kapiteln erläutert, bedeutet diese Forderung für die Erzeugung von Füllwasser aus Spülabwasser sowohl die sichere Entfernung oder Inaktivierung aller Krankheitserreger als auch eine ausreichende Entnahme von gelösten Stoffen. Da in dem betrachteten Fall der Spülabwasseraufbereitung zu Füllwasser aus einem unter Umständen extrem stark belasteten Wasser ein Wasser mit Trinkwasserqualität erzeugt werden soll, sind die konkreten Anforderungen an die Aufbereitungstechnologie und -sicherheit in diesem Fall besonders hoch.

An das Verfahren zur Aufbereitung von Füllwasser wird unter anderem die Forderung gestellt, nach dem **Prinzip der Mehrfachbarriere** Virendicht zu sein. Als Mehrfachbarriere ist lediglich die Kombination aus virendichter Membranbarriere und nachfolgender Desinfektion zugelassen. Neben den Anforderungen an die Aufbereitungstechnologie werden in der DIN 19645 entsprechend **Bild 12** weitere Forderungen an den Einsatz und die Beschaffenheit des Betriebswasser Typ 1 gestellt.

pdmp -Consulting
Dipl.-Ing. Andreas Loi-Brügger

Membrantechnik zur Schlammwasser-Aufbereitung

Betriebswasser Typ 1

- Aufbereitung von Spülabwasser zur Verwendung als Füllwasser in Schwimm- und Badebecken
- Füllwasser darf zu maximal 80 % aus Betriebswasser Typ 1 bestehen
- Keine Verwendung an Zapfstellen wo Trinkwasser vorgeschrieben
- Mikrobiologische Anforderungen entsprechend TrinkwV
- Aufbereitung entsprechend allgemein anerkannten Regeln der Trinkwasseraufbereitung
- Prinzip der Mehrfachbarriere (2 Virenbarrieren)
- Nachweis über korrosionstechnische Unbedenklichkeit

• Chlorat	≤ 5	mg/l
• Bromat	$\leq 0{,}2$	mg/l
• AOX	$\leq 0{,}1$	mg/l
• THM	$\leq 0{,}02$	mg/l
• Oxidierbarkeit	≤ 5	mg/l O_2
• $K_{S4,3}$	$\geq 0{,}7$	mg/l (möglichst gleich Beckenwasser)
• freies Chlor	$\geq 0{,}3$	mg/l
• Trübung	$\leq 0{,}2$	FNU (wird systembedingt eingehalten)

Bild 12 **DIN 19645 – Anforderungen an Betriebswasser Typ 1**

Eine Möglichkeit zur Darstellung einer virendichten Membranbarriere ist die Passage von zwei Membranen im Vollstrom, wobei Sinnvollerweise die erste Membran als UF und die zweite als NF oder RO ausgeführt ist. Die eingesetzten Membranmodule müssen jeweils die Fähigkeit zur Reduktion von Viren (MS2-Phagen) um 4 Zehnerpotenzen nachweisen. Eine Kontrolle der UF-Modulintegrität ist in diesem Fall bei Inbetriebnahme sowie nachfolgend i.d.R. alle 12 Monate durchzuführen. Die Überwachung der RO-/NF-Anlagen erfolgt kontinuierlich über die Leitfähigkeitsmessung.

Die beiden Membranen stellen in diesem möglichen Konzept (siehe **Bild 13**) gemeinsam die erste virendichte Barriere dar. Als zweite Barriere folgt eine Desinfektion, die lediglich im Ablauf der hier beschriebenen Membranbarriere als ausreichend wirksam erachtet wird. In der Regel wird man hier die Chlorung wählen, weil für das Endprodukt sowieso ein Chlorgehalt vorgeschrieben ist. Weitere Bestandteile in einem solchen Konzept sind vorgeschaltete Stufen zur Feststoffentnahme, die Aktiv-

kohlefiltration zur Entchlorung und als Senke für gelöste organische Verbindungen, sowie eine Aufhärtung, die mit der Vollstrom-RO/-NF notwendig wird.

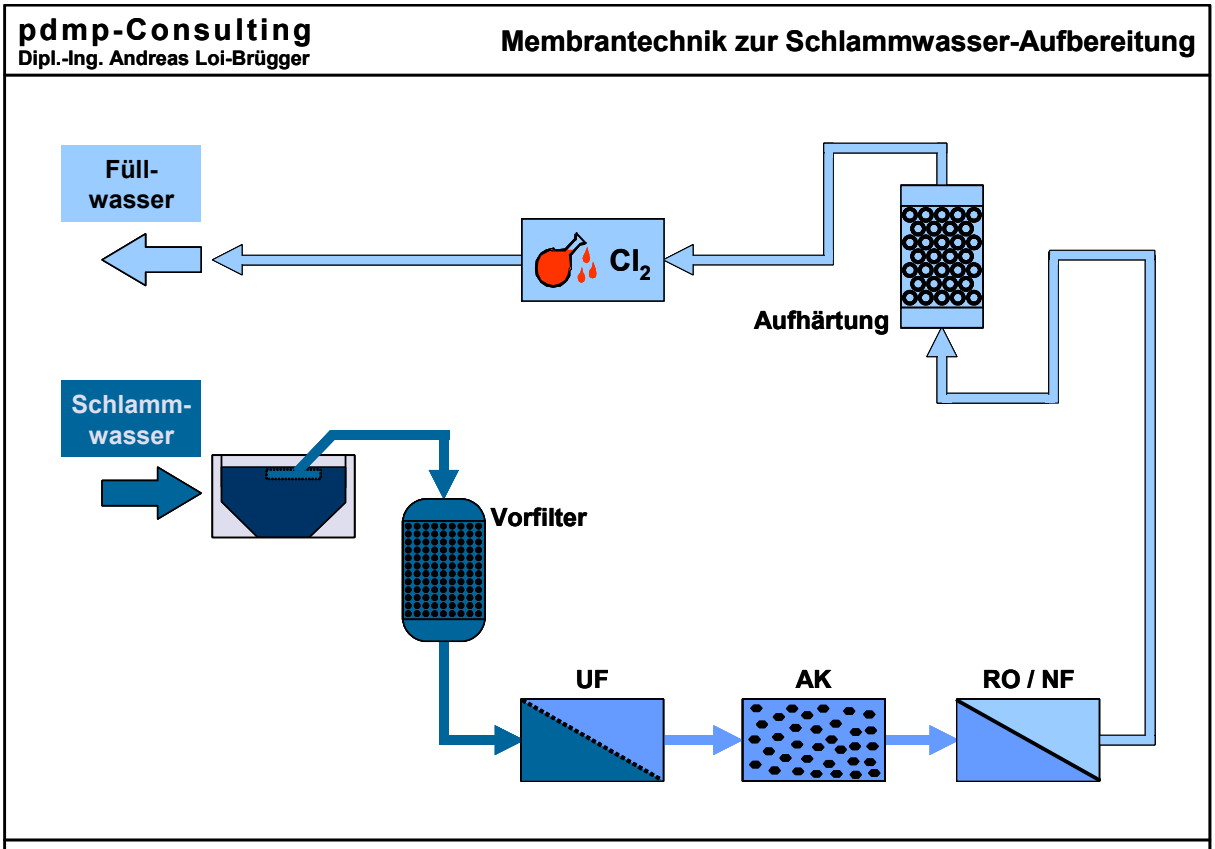

Bild 13 **DIN 19645 Mögliche Konzepte für Betriebswasser Typ 1 – Beispiel 1**

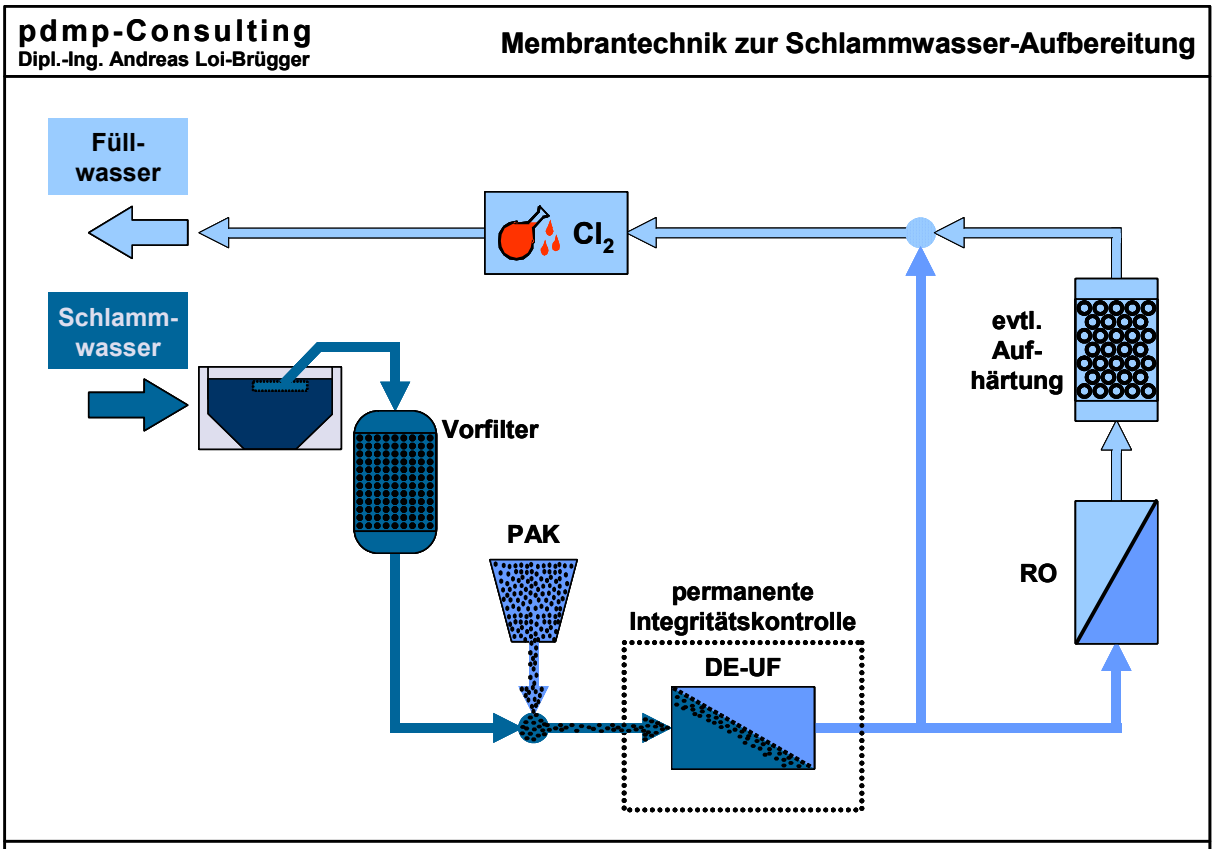

Bild 14 **DIN 19645 Mögliche Konzepte für Betriebswasser Typ 1 – Beispiel 2**

Ein weiteres mögliches Konzept nach DIN 19645 zeigt **Bild 14**. Hier ist lediglich eine Membranstufe vorgesehen, die allerdings im Neuzustand die Fähigkeit zur Virenreduktion um 7 Zehnerpotenzen nachweisen muss. Dazu kommen bisher lediglich UF-Membranen in Frage. Bei der einstufigen Membran als virendichte Barriere muss die Integrität der Membranmodule permanent überwacht werden. Hier bietet sich die Partikelzählung in Verbindung mit Pulveraktivkohledosierung im Zulauf zur Membrananlage an.

Abgesehen von ihrer Aufgabe als Indikator für Membranbrüche oder sonstige Undichtigkeiten im Modul stellt die Aktivkohle wiederum eine Senke für gelöste organische Wasserinhaltstoffe und ein Mittel zur Entchlorung dar. Um eventuell noch vorhandene organische und anorganische Belastungen des Wassers ausreichend zu entfernen, wird ein Teil des Filtrats der UF über eine RO-Membran und eventuell über eine Aufhärtung geleitet. Der Rest wird direkt mit dem RO-Permeat gemischt, das Mischwasser wird abschließend mit Chlor desinfiziert.

Zusammenfassung

Membranverfahren bieten interessante Möglichkeiten zur Verminderung von Kosten im Bereich der Wasseraufbereitung und Abwasserentsorgung oder zur Verbesserung der Aufbereitungsqualität. Dabei kommt der Eigenschaft von Membranen, eine robuste physikalische Barriere für partikuläre, kolloidale oder gelöste Wasserinhaltstoffe darzustellen, eine besondere Bedeutung zu.

Mit Hilfe der Membrantechnik wurden in den letzten Jahren über 150 Anlagen zur Aufbereitung von Abwasser aus der Spülung der konventionellen Filter realisiert. Dadurch konnte die benötigte Frischwassermenge und damit auch die anfallende Abwassermenge erheblich reduziert werden. Bei größeren Schwimmbädern kann bereits nach sehr kurzen Amortisationszeiten ein enormes Einsparpotential im Bereich der Betriebskosten ausgeschöpft werden.

Bei der Realisierung der Spülabwasseraufbereitung sind die jeweiligen wirtschaftlichen und technologischen Randbedingungen des Schwimmbades zu beachten. Auf unterschiedliche Gegebenheiten und Anforderungen kann durch die geeignete Auswahl eines der verschiedenen kommerziellen Anlagenkonzepte reagiert werden.

Bei der Aufbereitung von Spülabwasser zu Füllwasser kommt den Membranenverfahren die zentrale Rolle bei der dauerhaften Gewährleistung einer hohen Wasserqualität im Schwimmbad zu. Zum Einsatz kommen die druckgetriebenen Verfahren Ultrafiltration zur Entfernung von partikulären Stoffen (Feststoffe, pathogene Keime, Viren) und nachgeschaltet die Umkehrosmose zur Abtrennung der gelösten organischen und anorganischen Stoffe. Dabei muss die Membrantechnik hohen Anforderungen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit in punkto Sicherheit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit genügen. Dabei stellt die hydraulische Leistung der Membranen nur einen Gesichtspunkt dar. Mindestens ebenso wichtig ist eine verlässliche Permeat- bzw. Filtratqualität durch einen zuverlässig hohen Rückhalt.

Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass die Füll- bzw. Beckenwasserqualität und somit die Gesundheit von Badegast und Betriebspersonal durch die wirtschaftliche Vorteilnahme mit der Wiederverwendung aufbereiteten Spülabwassers nicht gefährdet wird. Daher ist auf eine sorgfältige Planung, kompetente Auswahl von Verfahrenstechnik und Anlagenkomponenten sowie verantwortungsbewusste Betriebsführung der Anlage zu achten. Die DIN 19645 führt in dieser Hinsicht entsprechende Anforderungen an die Aufbereitung auf.