

# Membranfiltrationsverfahren in der Trinkwasseraufbereitung – Leistung und Grenzen

Pia Lipp, Günther Baldauf und Wolfgang Kühn

## Trinkwasserversorgung, Mikrofiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration, Umkehrosmose

Zur Trinkwasseraufbereitung werden unterschiedliche Ressourcen, wie beispielsweise Oberflächen-, Grund- und Quellwässer genutzt. Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung der Rohwässer, resultieren jeweils spezifische Anforderungen an die Aufbereitungsverfahren. Eine der wesentlichen Aufgaben der Trinkwasseraufbereitung besteht in der Entfernung partikulärer Rohwasserinhaltsstoffe und Mikroorganismen. Ferner gewinnt die Entfernung gelöster Stoffe beispielsweise im Zusammenhang mit der zentralen Enthärtung bzw. Entsalzung zunehmend an Bedeutung. Zur Trinkwasseraufbereitung werden in jüngster Vergangenheit verstärkt Membranfiltrationsverfahren eingesetzt, insbesondere zur Entfernung von Trübstoffen und Mikroorganismen. Im vorliegenden Beitrag werden die Membranfiltrationsverfahren dargestellt und die Einsatzmöglichkeiten und -grenzen der Mikro- und Ultrafiltration zur Partikelentfernung bzw. der Nanofiltration und Umkehrosmose zur Entfernung gelöster Stoffe beschrieben.

For drinking water production several surface-, ground- and spring waters are used as resources. Depending on the water quality the requirements for the treatment processes are manifold. The main task in drinking water treatment is the removal of particles and microorganisms. However with regard to softening of hard ground waters or desalination of brackish waters the removal of dissolved solutes is of interest. Since a couple of years membrane filtration processes are increasingly implemented in drinking water treatment, especially for particle removal. In this paper membrane filtration processes are described and application fields as well as restrictions are discussed for particle removal by micro- and ultrafiltration and for removal of dissolved substances by nanofiltration or reverse osmosis for drinking water treatment.

## 1. Einleitung

Die Trinkwasseraufbereitungstechnik in Deutschland hat heute einen hohen Stand erreicht. Dies ist die Folge stetiger Forschung und Entwicklung im gesamten Wasserfach, wobei neben der Optimierung bestehender Aufbereitungstechniken der Einführung neuer Technologien eine besondere Bedeutung zukommt [1]. So werden beispielsweise die im industriellen Bereich bereits seit mehreren Jahrzehnten eingesetzten druckbetriebenen Membranfiltrationsverfahren zunehmend in der öffentlichen Trinkwasserversorgung eingesetzt [2].

Hierbei handelt es sich um die Verfahren Mikrofiltration (MF) und Ultrafiltration (UF) sowie Nanofiltration (NF) und Umkehrosmose (UO).

Gegenüber den konventionellen Aufbereitungstechniken, die sich seit Jahrzehnten in der Praxis bewährt haben, ergeben sich beim Einsatz von Membranfiltrationsanlagen neue Fragestellungen, einerseits aufgrund der bislang vorliegenden begrenzten Erfahrungen sowie andererseits auf-

grund der stetigen Weiterentwicklung dieser Technologie. Neben technischen Aspekten sind auch ökologische und ökonomische Belange mit zu berücksichtigen. Bei der Entscheidung für die im Einzelfall einzusetzende Technik sind stets die Vor- und Nachteile der möglichen Verfahren gegenüber zu stellen. Nachfolgend werden die verschiedenen Membranfiltrationsverfahren erläutert sowie deren Einsatzmöglichkeiten und -grenzen dargestellt.

## 2. Überblick über die verschiedenen Membranfiltrationsverfahren

Zur Abgrenzung der verschiedenen druckbetriebenen Membranfiltrationsverfahren sind in *Tabelle 1* charakteristische Kenndaten aufgeführt.

Die treibende Kraft für den Transport von Wasser durch die Membran ist bei allen in *Tabelle 1* genannten Verfahren die angelegte Druckdifferenz. Sie ist umso größer, je kleiner die Poren der Membranen sind.

Bei MF und UF werden Partikel und Wasserinhaltsstoffe, die größer sind als die Porenweite der Membran, zurückgehalten, während das Wasser die Membran durchtritt. Die Trennung beruht demnach rein physikalisch auf einem Sieb-

---

Dr.-Ing. Pia Lipp, Dr.-Ing. Günther Baldauf und Prof. Wolfgang Kühn, DVGW-Technologiezentrum Wasser (TZW), Karlsruher Straße 84, D-76139 Karlsruhe.

mechanismus. MF-Membranen weisen Poren größer als ca. 0,1 µm auf, UF-Membranen haben Poren, die um den Faktor 10 kleiner sind. Bakterien, *E.coli* und coliforme Keime, Enterokokken sowie *Clostridium perfringens* werden durch beide Verfahren vollständig zurückgehalten, so dass die Wirksamkeit der Verfahren MF und UF im Bereich der Trinkwasseraufbereitung in Bezug auf den Bakterienrückhalt als vergleichbar anzusehen ist. Parasitäre Mikroorganismen wie *Giardia lamblia* und *Cryptosporidium parvum* werden ebenfalls mit hohem Wirkungsgrad von beiden Membrantypen entfernt. Einzelne Viren können aufgrund ihrer geringen Größe von MF-Membranen nicht zurückgehalten werden. Da sich Viren jedoch erfahrungsgemäß im Wasser nicht frei bewegen sondern an Bakterien oder Partikel gebunden sind, weisen MF-Membranen dennoch einen gewissen Rückhalt an Viren auf [3]. MF und UF werden in der öffentlichen Trinkwasserversorgung bei der Aufbereitung von Oberflächen-, Karst- und Quellwässern sowie bei der Schlammwasseraufbereitung eingesetzt.

Bei NF/UF-Membranen handelt es sich nicht um poröse Membranen mit definierter Porenweite, sondern um homogene Polymerschichten, die aufgrund ihrer Struktur einen Rückhalt gegenüber verschiedenen gelösten Wasserinhaltsstoffen aufweisen. Neben Siebmechanismen spielen hier zusätzlich Wechselwirkungen zwischen Wasserinhaltsstoffen und dem Membranmaterial eine Rolle, die durch Oberflächenladungen verursacht werden. Aufgrund der dichten Membranschichten sind für einen Durchtritt von Wasser durch die Membranen entsprechend höhere Drücke aufzuwenden. Da durch NF/UF-Membranen gelöste Wasserinhaltsstoffe weitgehend entfernt werden, eignen sich diese Verfahren zur Enthärtung bzw. zur Vollentsalzung und zur Entfernung gelöster organischer Stoffe.

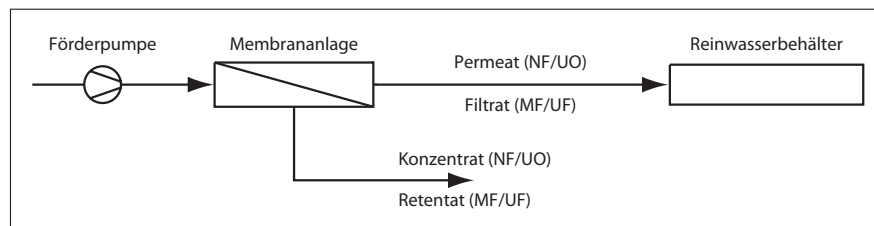
### 3. Aufbau von Membranfiltrationsanlagen

Kernstück jeder Membranfiltrationsanlage ist die Membran. Die in der Wasseraufbereitung genutzten Membranen bestehen aus organischen Polymerwerkstoffen. Gegenüber den früher fast ausschließlich auf der Basis von Celluloseacetat bestehenden Membranen werden heutzutage bei MF/UF-Anlagen fast ausschließlich Membranen aus Polyethersulfon und Polyvinylidenfluorid als Werkstoff verwendet, da diese Materialien sowohl mechanisch als auch chemisch beständiger sind und ein geringeres Foulingpotenzial aufweisen. Außerdem kann bei den regelmäßigen Spülungen auf die Zugabe relativ hoher Mengen an Chlor verzichtet werden.

NF/UF-Membranen sind üblicherweise aus mehreren Schichten verschiedener Polymere zusammengesetzt, durch

**Tabelle 1.** Membranfiltrationsverfahren und deren Einsatzgebiete.

Verfahren	Größe der abtrennbaren Stoffe, µm	Druckbereich, bar	Einsatzgebiete
Mikrofiltration MF	> 0,1	0,1–2	Partikelentfernung
Ultrafiltration UF	> 0,01	0,1–5	Partikelentfernung
Nanofiltration NF	> 0,001	3–20	Entfernung gelöster Stoffe (z. B. Calcium, Sulfat, gel. organische Substanzen)
Umkehrosmose UO	> 0,0001	10–100	Vollentsalzung, Entfernung gelöster organischer Substanzen



**Bild 1.** Verfahrensschema einer Membranfiltrationsanlage.

die die Rückhalteeigenschaften sowie die Durchlässigkeit eingestellt werden können. Membranen werden in NF/UF-Anlagen hauptsächlich in Form von Flachmembranen als Platten- oder Wickelmodule, in MF/UF-Anlagen hauptsächlich als Membranmodule mit mikroporösen, asymmetrischen Hohlfasern eingesetzt. Die als physikalische Barriere wirkende aktive Trennschicht ist dabei nur wenige Mikrometer dick.

Prinzipiell besteht eine Membranfiltrationsanlage aus einer Druckerhöhungspumpe, den Membranmodulen und einem nachgeschalteten Reinwasserbehälter (Bild 1).

Alternativ kann die wirksame Druckdifferenz bei MF/UF auch durch Anlegen eines Unterdruckes auf der Filtratseite erreicht werden. Die Pumpe ist dann zwischen der Membrananlage und dem Reinwasserbehälter angeordnet.

Durch die Membranfiltration wird der Rohwasserstrom in zwei Teilströme aufgeteilt, einen an Wasserinhaltsstoffen verarmten Teilstrom, der bei MF/UF als *Filtrat*, bei NF/UF als *Permeat* bezeichnet wird. Der zweite Teilstrom enthält die von den Membranen zurückgehaltenen Wasserinhaltsstoffe in erhöhter Konzentration. Bei NF/UF-Anlagen fällt das sogenannte *Konzentrat* kontinuierlich im Prozess an, bei MF/UF-Anlagen fällt demgegenüber das *Retentat* nur stündlich über einen kurzen Zeitraum von wenigen Minuten während der Spülung an.

Im DVGW Arbeitsblatt W 213-5 werden Begriffe und Anforderungen definiert sowie Hinweise zu Planung und Bau von MF/UF-Anlagen gegeben [4]. Für die Anwendung der NF/UF in der öffentlichen Trinkwasserversorgung liegt noch kein Arbeitsblatt vor.

### 4. Betriebsweise

#### 4.1 Fouling

Die von den Membranen zurückgehaltenen Wasserinhaltsstoffe reichern sich an der Membranoberfläche an, wodurch

**Tabelle 2.** Übliche Spül- und Reinigungsintervalle.

	MF	UF	NF	UO
Spülung mit Filtrat	stündlich	stündlich	keine	keine
Spülung mit Filtrat unter Zugabe von Chemikalien	keine	täglich	keine	keine
Chemische Reinigung	wöchentlich	monatlich	halbjährlich	halbjährlich
Konditionierung	keine	keine	kont.	kont.

**Tabelle 3.** Spülwasserbedarf (Werte in % bezogen auf die der Membranfiltrationsanlage zugeführten Rohwassermenge).

	MF	UF	NF	UO
Gesamter Spülwasserbedarf	2–6	2–10 (15)	–	–
für Spülungen nur mit Filtrat	2–5	2–8 (10)	–	–
für Spülungen mit Filtrat + Chemie	–	0–2 (5)	–	–
Chemische Reinigungsabwässer	0-1	0,1	0,1	0,1
Konzentratanfall	–	–	10–25	10–25

es zu einer Verblockung der Poren und damit zu einer Abnahme der Durchlässigkeit der Membranen kommt. Dieser Effekt wird als Fouling bezeichnet. Abhängig von der Art der Wasserinhaltsstoffe, die die Verblockung verursachen, unterscheidet man zwischen partikulärem Fouling, kolloidalem Fouling, organischem Fouling, Biofouling durch Mikroorganismen oder Scaling. Letzteres wird durch Überschreitung von Löslichkeitsprodukten aufgrund der Anreicherung schwerlöslicher Salze an der Membranoberfläche verursacht und kann vor allem bei NF und UO zu Schwierigkeiten im Betrieb führen. Aus diesem Grund muss das durch NF/UO zu behandelnde Wasser entsprechend konditioniert werden. Üblicherweise wird in den Zulauf von NF/UO-Anlagen eine Mineralsäure dosiert, um den pH-Wert abzusenken und somit ein Ausfallen von Karbonaten zu verhindern. Bei Vorhandensein von Sulfaten oder Silikaten müssen zusätzlich komplexbildende Stoffe zugesetzt werden, deren bekanntester Vertreter Natriumhexametaphosphat ist. Gemäß § 11 Trinkwasserverordnung müssen die zur Anwendung kommenden Aufbereitungsstoffe gelistet sein [5].

## 4.2 Spülung und Reinigung

Um die Durchlässigkeit, auch Permeabilität genannt, bei der MF/UF aufrecht zu erhalten und den ansteigenden Druckverlust zu begrenzen, ist es erforderlich, die Membranen in regelmäßigen Abständen zu spülen oder chemisch zu reinigen. Üblicherweise werden die Membranen regelmäßig mit Filtrat entgegen der Filtrationsrichtung gespült. Einige Systeme setzen zu dieser Spülung zeitweise Chemikalien ein, andere unterstützen den Spülprozess durch Zufuhr von Luft auf der Rohwasserseite, um so mechanisch eine Verbesserung des Reinigungseffektes zu erzielen. Ziel der Spülprozesse ist die vollständige Entfernung der auf den Membranoberflächen während des Filtrationsvorganges gebildeten Beläge.

NF/UO-Membranen werden dagegen nicht regelmäßig gespült. Einem Druckanstieg kann nur durch eine chemische Reinigung der Membranen entgegengewirkt werden. Die Häufigkeit solcher Reinigungen hängt dabei sehr stark von den Betriebsbedingungen und der Aufgabenstellung ab und erfolgt meist in halbjährlichen Intervallen.

Übliche Spül- und Reinigungsintervalle für die verschiedenen Membranfiltrationsverfahren sind in *Tabelle 2* gegenüber gestellt.

In der Praxis erfolgt die Spülung von MF/UF-Membranen zeitabhängig, wobei das Spülintervall in Abhängigkeit von der Rohwasserbeschaffenheit festgelegt wird. Während der Filtration

erfolgt ein Anstieg des Transmembrandruckes (TMP), der überwacht wird. Bei Überschreiten eines vorgegebenen maximalen TMP wird eine vorzeitige Spülung eingeleitet, um eine zu starke Belastung der Membranen zu verhindern. Wird das Spülintervall nach der schlechtesten Rohwasserbeschaffenheit festgelegt, erfolgt bei guter Wasserbeschaffenheit die Spülung früher als erforderlich, woraus ein größerer Spülwasserbedarf resultiert. Dies gilt analog auch für Anlagen, die nicht mit Nennleistung sondern mit geringerer Flächenbelastung betrieben werden.

Als Kriterium für die Einleitung einer Spülung sollte somit zunächst eine maximal durchzusetzende Filtratmenge unter Einhaltung einer vorgegebenen maximalen Filtrationszeit gewählt werden. Sollte dabei der TMP einen vorgegebenen Schwellenwert überschreiten, ist vorzeitig eine Spülung einzuleiten.

Die Spülhäufigkeit sowie der erforderliche Chemikalienbedarf werden im Wesentlichen durch die Rohwasserinhaltsstoffe bestimmt. Bei der UF liegt beispielsweise der Gesamtspülwasserbedarf in der Größenordnung von 2 bis 10%, bei starker Rohwasserbelastung bis 15%, wie aus *Tabelle 3* hervorgeht. Bei Anwendung der MF liegen die entsprechenden Werte niedriger.

Heute sind UF-Anlagen auf dem Markt, bei denen 80 bis 90% der anfallenden Schlammwässer frei von Chemikalien sind und somit lediglich die aus dem Wasser abgetrennten Feststoffe enthalten. MF-Anlagen werden in der Regel ohne Zugabe von Chemikalien gespült.

Da durch Spülungen die an den Membranoberflächen gebildeten Ablagerungen meist nicht vollständig entfernt werden können, müssen MF/UF-Membranen in größeren zeitlichen Abständen chemisch gereinigt werden, um die ursprüngliche Leistung zu erreichen. Hierzu werden Säuren und Laugen eingesetzt, mit denen sich bei erhöhten Temperaturen und einer Einwirkzeit zwischen ein und mehreren Stunden gute Reinigungseffekte erzielen lassen.

Bei chemischen Reinigungen von NF/UO-Anlagen fallen im Durchschnitt vergleichbare Mengen an Reinigungsabwässern wie bei MF/UF-Anlagen an. Ein Vergleich der Angaben über den Spülwasserbedarf verschiedener Verfahren ist allerdings nur dann sinnvoll, sofern dieselbe Bezugsgröße zugrunde gelegt wird. Der prozentual größte Anteil der zu entsorgenden Abwassermenge fällt beim Betrieb von NF/UO-Anlagen durch die kontinuierliche Produktion von Konzentrat an. Sie liegt in der Größenordnung von 10 bis 25%. Da jedoch meist nur ein Teilstrom der gesamten Rohwassermenge für die Trinkwasserversorgung mittels NF/UO behandelt und anschließend mit unbehandeltem Rohwasser gemischt wird, vermindert sich der spezifische Konzentratanfall entsprechend.

Zur Spülung und Reinigung von Membranen werden verschiedene Chemikalien eingesetzt, wie in *Tabelle 4* aufgeführt.

Aufgrund der fortschreitenden Erkenntnisse und Erfahrungen beim Betrieb von Membranfiltrationsanlagen ist auch eine gewisse Entwicklung hinsichtlich der Wahl und der erforderlichen Einsatzmengen von Spül- und Reinigungschemikalien zu verzeichnen.

Ursprünglich wurden Membranen aus Celluloseacetat zur Trinkwasseraufbereitung eingesetzt. Zur Vermeidung von Biofouling sind diese Membranen regelmäßig mit chlorhaltigem Filtrat zu spülen. Durch die Reaktion von freiem Chlor mit den auf der Membran abgeschiedenen organischen Stoffen resultieren im Schlammwasser sowie im Erstfiltrat erhebliche Konzentrationen an chlororganischen Verbindungen (THM und AOX). Neben der unerwünschten Bildung dieser Verbindungen im Aufbereitungsprozess kann daraus ein Problem hinsichtlich der Entsorgung der Schlammwässer entstehen, sofern der jeweils geltende Abwassergrenzwert von beispielsweise 0,2 mg/L AOX überschritten wird. Durch die Entwicklung geeigneter Werkstoffe für MF/UF-Membranen wurde es möglich, die Zugabe von Chlor bei jeder Spülung durch Wasserstoffperoxid zu ersetzen. Die Erfahrungen mit dem Betrieb von Anlagen bei mehreren Projekten zeigten jedoch, dass Wasserstoffperoxid wenig effektiv ist. Inzwischen wird Wasserstoffperoxid durch wechselnden Einsatz von Säuren bzw. Laugen ersetzt. Dabei entsteht ein neutrales, relativ gering salzhaltiges Abwasser, das problemlos zu entsorgen ist [1; 6]. Üblicherweise erfolgt bei den heute eingesetzten Membranen die Spülung primär mit Filtrat gegebenenfalls unter Zugabe von Luft auf der Rohwasserseite, wobei in größeren zeitlichen Abständen die Säure bzw. Lauge im Wechsel zugegeben wird. Vor der Ableitung der anfallenden Schlammwässer müssen diese gegebenenfalls neutralisiert werden, um den Anforderungen gemäß Anhang 31 Abwasserverordnung zu genügen.

Beim Einsatz von Zitronensäure zur chemischen Reinigung der Membranen ist anschließend auf eine ausreichende Spülung zu achten, um aufgrund der guten Bioverfügbarkeit der Substanz eine Verkeimung der nachgeschalteten Leitungssysteme zu vermeiden.

Beim Betrieb von MF/UF-Anlagen sollte eine Optimierung mit dem Ziel erfolgen, die Anzahl an Spülungen, die anfallenden Schlammwassermengen sowie den Chemikalienbedarf zu minimieren und eine möglichst lange Lebensdauer der Membran zu erreichen.

Spülwasser- und Chemikalienbedarf sind für ein vorgegebenes Membranfiltrationsverfahren in erster Linie von der Rohwasserbeschaffenheit sowie der eingestellten Flächenbelastung abhängig. Für Membranfiltrationsverfahren übliche Flächenbelastungen gehen aus *Tabelle 5* hervor.

**Tabelle 4.** Spül- und Reinigungschemikalien.

	MF	UF	NF	UO
Mineralsäuren, Laugen	X	X	X	X
Chlor, Chlorbleichlauge, Chlordioxid	–	X	–	–
Wasserstoffperoxid	–	X	–	–
Zitronensäure	X	X	X	X

**Tabelle 5.** Betriebsdaten verschiedener Membranfiltrationsverfahren.

	MF	UF	NF	UO
Flächenbelastung l/m <sup>2</sup> /h	100–150	50–90	20–30	15–20
Energiebedarf im Betrieb kWh/m <sup>3</sup>	0,05–0,2	0,05–0,2	0,4	0,8
Energiebedarf für Spülung kWh/m <sup>3</sup>	0,4	0,4	–	–

Die jeweils abhängig von der vorliegenden Rohwasserbeschaffenheit erreichbare Flächenbelastung bestimmt die zur Erreichung einer geforderten Nennleistung erforderliche Membranfläche. Grundsätzlich ist die zu installierende Membranfläche zu minimieren und die Anlage mit möglichst hoher Flächenbelastung zu betreiben. Erfahrungsgemäß steht dem gegenüber, dass eine zunehmende Flächenbelastung mit einem höheren Spülwasser- und Chemikalienbedarf verbunden ist. Im Einzelfall ist ein Optimum zwischen Flächenbelastung, Spülwasser- und Chemikalienbedarf zu ermitteln.

Für den Einsatz in der Trinkwasseraufbereitung stehen eine Reihe verschiedener MF/UF-Membransysteme zur Verfügung, die sich hinsichtlich der eingesetzten Membrantypen (Struktur, Material und Modulbauart), der angelegten Druckdifferenz (Überdruck, Unterdruck), des Betriebsmodus (Dead-End, Cross-Flow) sowie der Anströmung der Membranen (IN-OUT, OUT-IN) unterscheiden [7].

In *Tabelle 6* ist der Spülwasser- und Chemikalienbedarf beispielhaft für einige bestehende UF-Anlagen aufgelistet,

**Tabelle 6.** Spülwasser- und Chemikalienbedarf.

Beispiel		A	B	C	D	E	F	G
Flächenbelastung	l/m <sup>2</sup> /h	50	64	85	60	100	66	70
Betriebszeit	a	6	3	2	1	1	0,5	0,3
Spülwasserbedarf	%	6	6	5,9	8–12	6	3	2
davon chemikalienhaltig	%	1	1	1,5	–	–	0,3	<0,1
Spez. Chemikalienbedarf								
Natronlauge	g/m <sup>3</sup>	2,1	–	0,03	–	–	–	–
Natriumhypochlorit	g/m <sup>3</sup>	0,4	0,4	–	0,4	0,1	0,1	0,1
Salpetersäure	g/m <sup>3</sup>	–	–	0,01	–	–	–	–
Salzsäure	g/m <sup>3</sup>	2,6	–	–	–	–	–	–
Wasserstoffperoxid	g/m <sup>3</sup>	–	1,6	3,8	–	–	–	–
Zitronensäure	g/m <sup>3</sup>	–	–	–	–	–	–1	0,2

- A) Mischwasser aus weichem Talsperren- und Quellwasser nach Kalksteinfiltration [6,8]
- B) Quellwasser nach mechanischer und chemischer Entsäuerung [7,9]
- C) mittels Schnell-/Aktivkohle- und Langsamfiltration vorbehandeltes Talsperrenwasser [10]
- D) weiches, algen- und trübstoffhaltiges Talsperrenwasser [11]
- E) trübstoffarmes Seewasser, 10°dH [11]
- F) weiches, trübstoffarmes Quellwasser mit zeitweise erhöhten Gehalten an Trübstoffen >1 FNU [12]
- G) weiches, trübstoffhaltiges, zeitweise huminstoffhaltiges Quellwasser

**Tabelle 7.** Rückhalt mikrobiologischer Parameter durch UF-Membranen [9].

	<b>E.coli, 1/100 mL</b>	<b>Coliforme Bakterien, 1/100 mL</b>	<b>Entero- kokken, 1/100 mL</b>	<b>Koloniezahl 36 °C, 2 d, KBE/mL</b>	<b>Koloniezahl 20 °C, 2 d, KBE/mL</b>
vor UF	>200,5	>200,5	47	69	78
nach UF	<1	<1	0	6	2

die mit weichen bis mittelharten Wässern beaufschlagt wurden.

Abhängig von der unterschiedlichen Rohwasserbeschaffenheit in den genannten Beispielen ergeben sich naturgemäß

**Tabelle 8.** Einsatzbereiche und Aufbereitungswirksamkeit verschiedener Membranfiltrationsverfahren.

	<b>MF</b>	<b>UF</b>	<b>NF</b>	<b>UO</b>
Trübung	+++	+++	*	*
Partikel (1–100 µm)	+++	+++	*	*
E. coli	+++	+++	+++	+++
Coliforme Keime	+++	+++	+++	+++
Clostridium perfringens	+++	+++	+++	+++
MS2-Phagen	+	+++	+++	+++
Parasiten	+++	+++	+++	+++
Calcium, Magnesium	--	--	++	++
Natrium, Kalium	--	--	+	++
Sulfat	--	--	++	++
Chlorid	--	--	+	++
Nitrat	--	--	+	++
Pestizide	--	--	++	++
Huminstoffe	--	-	++	++

- \* Vorbehandlung erforderlich
- +++ vollständiger Rückhalt
- ++ weitgehender Rückhalt
- + eingeschränkter Rückhalt
- geringer Rückhalt
- kein Rückhalt

**Tabelle 9.** Gegenüberstellung von Kriterien für die Wahl zwischen MF/UF und konventioneller Filtration.

	<b>Konventionelle Filtration</b>	<b>Ultrafiltration</b>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Naturnahes Verfahren</li> <li>• Bewährte Technologie</li> <li>• Weitgehende Entfernung von Partikeln und Färbung</li> <li>• Zugabe von Flockungsmitteln/ Flockungshilfsmitteln</li> <li>• Abwasseranfall gering</li> <li>• Druck-/drucklose Betriebsweise</li> <li>• Laufzeitbegrenzung: Differenzdruck, Filtrattrübung, Zeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vollautomatischer Betrieb</li> <li>• Geringerer Raumbedarf</li> <li>• Vollständige Partikelentfernung</li> <li>• Druck-/Unterdruck-Betrieb</li> <li>• Modularer Aufbau</li> <li>• Stark schwankende Rohwasserbeschaffenheit beherrschbar</li> <li>• Einfache In- und Außerbetriebnahme</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebs- und Überwachungsaufwand erforderlich</li> <li>• Anpassung an rasche Rohwasseränderung nicht automatisierbar</li> <li>• Beherrschbare Rohwassertrübung begrenzt</li> <li>• Personalaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrenzte Betriebserfahrungen</li> <li>• Kurze Filterlaufzeiten</li> <li>• Abwasseranfall</li> <li>• Laufzeitbegrenzung: Zeit, Transmembrandruck</li> <li>• Regelmäßiger Einsatz von Spül- und Reinigungskemikalien</li> <li>• Chemikalienhaltige Abwässer</li> </ul>

Unterschiede sowohl im Spülwasser- als auch im Chemikalienbedarf. Die Werte dienen einer groben Orientierung.

## 5. Leistungsfähigkeit

Im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit der Membranfiltrationsverfahren ist grundsätzlich zwischen MF/UF zur Partikelentfernung und NF/UO zur Entfernung gelöster Stoffe zu unterscheiden. Als Partikel werden dabei organische und anorganische partikuläre Wasserinhaltsstoffe wie z. B. Mikroorganismen, Trübstoffe, Parasiten, suspendierte Stoffe bezeichnet, als gelöste Substanzen bspw. Salze, Huminstoffe und organische Mikroverunreinigungen.

Durch UF-Membranen werden Mikroorganismen vollständig zurückgehalten, wie dies beispielhaft in *Tabelle 7* dargestellt ist.

Eine qualitative Bewertung der Aufbereitungswirksamkeit der Membranfiltrationsverfahren hinsichtlich verschiedener Wasserinhaltsstoffe ist in *Tabelle 8* gegeben.

Der Partikelrückhalt ist bei MF- und UF-Membranen sehr weitgehend, wobei UF-Membranen darüber hinaus Kolloide und Viren vollständig entfernen. Für gelöste natürliche organische Wasserinhaltsstoffe liegt das Rückhaltevermögen von UF-Membranen im Bereich von 5 bis 20%. Zur weitergehenden Entfernung gelöster organischer Wasserinhaltsstoffe kann die MF und UF mit der klassischen Flockung kombiniert werden.

Gelöste organische Wasserinhaltsstoffe lassen sich mit NF/UO-Membranen zu über 90% zurückhalten. Mit dem ausschließlichen Ziel, gelöste organische Substanzen aus dem Wasser zu entfernen, kommt der Einsatz von NF/UO nicht in Betracht, da mit diesen Verfahren keine selektive Entfernung gelingt. Durch NF-Membranen werden bevorzugt zweiwertige Ionen, durch UO-Membranen sämtliche ionogenen Wasserinhaltsstoffe, d.h. auch einwertige Ionen aus dem Rohwasser entfernt. Die UO dient somit der Vollentsalzung von Wässern und ist weltweit zur Meerwasserentsalzung im Einsatz. Membranfiltrationsanlagen zur Teilentsalzung bzw. Teilenthärtung werden in der öffentlichen Trinkwasserversorgung bislang selten eingesetzt. Allerdings gewinnen diese Verfahren im Zusammenhang mit der verstärkten Diskussion um die zentrale Enthärtung zunehmend an Bedeutung [13; 14; 15]. Eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz dieser Membranfiltrationsverfahren ist ein weitestgehend trübstoffreies Rohwasser, damit eine Verblockung der Module verhindert wird. Zur Vorbehandlung von Wässern, die einer NF/UO-Behandlung zugeführt werden, werden zunehmend anstelle konventioneller Filteranlagen MF/UF-Anlagen eingesetzt.

Allgemein gültige Kriterien für die Wahl der MF/UF-Anlagen gegenüber der konventionellen Filtration zur Partikelentfernung sind in *Tabelle 9* gegenübergestellt.

Anhand der aufgeführten Kriterien ist im Einzelfall abzuwägen, welchem Verfahren der Vorzug zu geben ist.

## 6. Anwendungsbeispiele

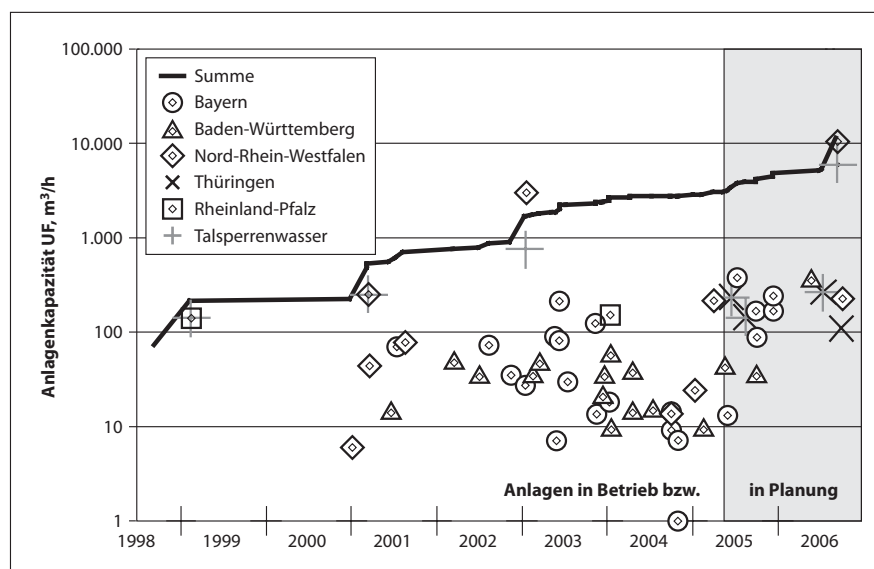
### 6.1 Überblick

In der öffentlichen Trinkwasserversorgung in Deutschland werden Membranfiltrationsverfahren seit 1982 eingesetzt. Vor einer großtechnischen Realisierung wurden jeweils eingehende Voruntersuchungen im Rahmen von F & E-Vorhaben durchgeführt. Beispiele hierfür sind die UO-Anlage Duderstadt zur Sulfatentfernung aus einem Quellwasser sowie eine Anlage zur Meerwasserentsalzung auf Helgoland [16].

Mit Pilotuntersuchungen zum Einsatz von Membranfiltrationsverfahren zur Partikelentfernung wurde vor ca. 10 Jahren begonnen, wobei eine der wesentlichen Ursachen hierfür das Auftreten trinkwasserbedingter Erkrankungen durch Parasiten in den angelsächsischen Ländern war.

Zum damaligen Zeitpunkt waren lediglich ein Mikrofiltrationssystem (0,2 µm Porenweite) sowie ein Ultrafiltrationssystem (0,01 µm Porenweite) auf der Basis von Celluloseacetat als Membranwerkstoff verfügbar. Im Rahmen von Pilotuntersuchungen wurde die Leistungsfähigkeit dieser Systeme in Bezug auf den Rückhalt von Partikeln, Trübstoffen und Mikroorganismen zunächst bei der Aufbereitung von See- und Talsperrenwasser ermittelt, wobei stets eine einwandfreie Filtratqualität resultierte. Unterschiede bestanden in der Art der Spülung sowie im hydraulischen Verhalten. Während bei der Mikrofiltration ein ausgeprägter sägezahnartiger Verlauf des Transmembrandruckes über der Zeit resultierte, ergab sich bei der Ultrafiltration nur ein geringer Anstieg des Transmembrandruckes zwischen zwei Reinigungen.

Die Membranen des UF-Systems wurden regelmäßig nach 30 bis 60 Minuten Filtrationsbetrieb mit Filtrat unter Zugabe von Chlor entgegen der Filtrationsrichtung gespült. Dabei fiel ein schlammhaltiges Wasser an, das zu entsorgen war. Die Membranen des MF-Systems wurden demgegenüber mit Luft ebenfalls entgegen der Filtrationsrichtung gespült, wobei gleichzeitig die abgespülten Beläge mit Rohwasser aus dem System ausgetragen wurden. Der Einsatz von Reinigungschemikalien war abhängig von der Rohwasserbeschaffenheit in Abständen von 14 Tagen erforderlich, um die ursprüngliche Durchsatzleistung, die sich während des Filtrationsbetriebs verringerte, wiederherzustellen.



**Bild 2.** Zunehmende Aufbereitungskapazitäten der Membranfiltration zur Partikelentfernung mittels Mikro- und Ultrafiltration zur Trinkwasseraufbereitung

Im Mittel resultierten bei beiden Systemen vergleichbare Permeabilitäten in der Größenordnung von 100 l/m<sup>2</sup>/h/bar bei Rohwassertemperaturen von ca. 6 °C.

Erhöhte Gehalte an gelösten natürlichen organischen Wasserinhaltsstoffen führten zu einer Verringerung der Durchsatzleistung der Membranen sowie einer Erhöhung des Chemikalienbedarfs.

Großtechnisch wurden UF-Anlagen zur Partikelentfernung in Deutschland erstmals 1998 in Betrieb genommen. Seither steigt die Anzahl installierter Anlagen kontinuierlich an, wie aus *Bild 2* hervorgeht. Die Nennleistungen liegen im Bereich von 10 bis 750 m<sup>3</sup>/h. Derzeit befindet sich eine Anlage mit einer Durchsatzleistung von 6000 m<sup>3</sup>/h in der Realisierungsphase [17].

Aus *Bild 2* wird deutlich, dass Anlagen mit höheren Durchsatzleistungen zur Talsperrenwasseraufbereitung, die übrigen zur Quellwasseraufbereitung eingesetzt werden. Die meisten Quellwasseraufbereitungsanlagen werden in Bayern und Baden-Württemberg betrieben, da hier Karstgebiete und klüftige Grundwasserleiter vorliegen und zur Rohwassergewinnung genutzt werden. Insbesondere nach Niederschlagsereignissen treten Belastungsspitzen im Hinblick auf Trübung und Mikroorganismen auf, sodass diese Wässer einer Aufbereitung zu unterziehen sind. Anlagen zur Aufbereitung von Talsperrenwasser befinden sich derzeit in Nordrhein-Westfalen und Thüringen in Betrieb bzw. in Planung.

Um zu entscheiden, in welchem Umfang Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserbeschaffenheit mikrobiell belaste-

**Tabelle 10.** Vorgehensweise zur Beurteilung der Notwendigkeit und Umsetzung aufbereitungs-technischer Maßnahmen aus hygienischer Sicht.

1.	Rohwassermonitoring (kontinuierliche Trübungsmessung, quantitative Bestimmung von Mikroorganismen)
2.	Bewertung der Untersuchungsergebnisse, Abschätzen des Handlungsbedarfs, Priorisierung der Maßnahmen
3.	Dokumentation der örtlichen Randbedingungen (Standort, Raumangebot, Möglichkeiten der Schlammwasserentsorgung, Wasserdargebot, Wasserbedarf)
4.	Pilotversuche (repräsentativer Zeitraum, Auswahl von Membransystemen, Ermittlung der Eckdaten für die Auslegung)
5.	Großtechnische Umsetzung

**Tabelle 11.** Quellwasseraufbereitung mittels UF und MF-Vergleichsdaten.

		UF-Anlage	MF-Anlage
Spülwasserbedarf	%	8	2
Spez. Chemikalienbedarf			
Natronlauge	g/m <sup>3</sup>	0,22	0,10
Salzsäure	g/m <sup>3</sup>	0,43	–
Natriumhypochlorit	g/m <sup>3</sup>	–	0,01
Wasserstoffperoxid	g/m <sup>3</sup>	0,11	–
Energiebedarf	kWh/m <sup>3</sup>	0,15	0,20
Spezifischer Durchsatz	l/m <sup>2</sup> /h	80	100

ter Rohwässer erforderlich sind, wird die in *Tabelle 10* dargestellte Vorgehensweise (Punkte 1 bis 3) empfohlen.

Zur Ermittlung der Basisdaten als Grundlage für die Auslegung einer Großanlage wird die Durchführung von Pilotversuchen empfohlen. Diese sollten insbesondere bei Großanlagen mit Aufbereitungskapazitäten größer 200 m<sup>3</sup>/h über einen ausreichend langen Zeitraum von mindestens drei Monaten unter Berücksichtigung von Schwankungen in der Rohwasserbeschaffenheit durchgeführt werden.

## 6.2 Mikro- oder Ultrafiltration?

Am Beispiel einer Quellwasseraufbereitung werden die Vor- und Nachteile von Mikro- und Ultrafiltration gegenübergestellt. Insbesondere nach Niederschlagsereignissen treten im vorliegenden Fall zeitweise erhöhte Trübstoffgehalte auf. Dies erforderte die Erweiterung der Aufbereitungsanlage um eine Verfahrensstufe zur Partikelentfernung. Damit sollte sichergestellt werden, dass vor der abschließenden UV-Desinfektion eine ausreichend niedrige Trübung vorliegt. Wie aus *Tabelle 11* hervorgeht, ergab sich bei gleicher Filtratqualität bei der Mikrofiltration ein vergleichsweise geringerer Spülwasser- und Chemikalienbedarf [7].

Trotz der größeren Porenweite resultierte für die MF-Anlage ein höherer Energiebedarf. Die Ursache ist neben der besonderen Struktur der verwendeten MF-Membranen in der Tatsache begründet, dass die MF-Anlage bei einem höheren Betriebsdruck und höherer Flächenbelastung sowie mit Luftspülung betrieben wurde.

Der geringere Spülwasser- und Chemikalienbedarf war ausschlaggebend für die Entscheidung, eine MF-Anlage

großtechnisch zu realisieren. Aufgrund der vertikalen Aufstellung der Module konnte die Anlage in dem vorhandenen Gebäude erstellt werden. Die MF-Anlage läuft ohne Druckerhöhung, da das mit einem Druck von 3 bis 5 bar anstehende Quellwasser die MF-Anlage durchströmt und direkt den beiden offenen Entsäuerungsfiltern zuläuft.

Das Filtrat erfüllt bereits vor der abschließenden UV-Desinfektion die Anforderungen gemäß UBA [18] und DVGW-Arbeitsblatt W 290 [19]. Aufgrund der vorliegenden Quellwasserbeschaffenheit, gekennzeichnet durch

sporadisch auftretende Trübungen sowie eine insgesamt geringe mikrobiologische Belastung, erscheint die Kombination von MF und UV im vorliegenden Fall als geeignetes Verfahren. Im Übrigen besteht technisch die Möglichkeit bei einer Verschlechterung der Rohwasserbeschaffenheit die MF-Module gegen UF-Module auszutauschen.

## 6.3 Einfluss der Vorbehandlung auf den Betrieb von Membranfiltrationsanlagen

Die Vorbehandlung des Rohwassers hat einen wesentlichen Einfluss auf das Betriebsverhalten von Membranfiltrationsanlagen. Beispielhaft wird dies an Pilotuntersuchungen an zwei unterschiedlichen Standorten dargestellt. In beiden Fällen handelt es sich um Talsperrenwasserwerke. Im ersten Fall konnte in der Versuchsphase ein stabiler Betrieb der UF-Anlagen nur mit unbehandeltem Talsperrenwasser nach Zugabe von Flockungsmitteln erreicht werden. Allerdings ist diese Betriebsweise mit einem vergleichsweise hohen Spülwasserbedarf verbunden, sodass eine weitere UF-Anlage zur Behandlung der in der ersten UF-Stufe anfallenden Schlammwässer zur Erhöhung der Gesamtausbeute erforderlich ist [17].

In weiteren Fällen ergaben halbtechnische Untersuchungen, dass ein Betrieb der UF-Anlagen mit unbehandeltem Talsperrenwasser nach Zugabe von Flockungsmitteln nicht nur mit einem höheren Spülwasserbedarf sondern auch mit höheren Einsatzmengen an Chemikalien verbunden war als der Betrieb mit vorbehandeltem Talsperrenwasser nach Flockung und Filtration. Eine Vorbehandlung des Talsperrenwassers erlaubte darüber hinaus eine größere Flächenbelastung und eine höhere Ausbeute. *Tabelle 12* zeigt die Ergebnisse beispielhaft für ein UF-System, bei dem mit vorbehandeltem Talsperrenwasser eine im Vergleich zur Beschickung der Membranfiltrationsanlage mit geflocktem Talsperrenwasser um den Faktor 2 höhere Flächenbelastung erreicht werden konnte.

Als Konsequenz resultiert daraus ferner, dass im letzteren Fall die großtechnische UF-Anlage nach einer Vorbehandlung des Talsperrenwassers mit einer deutlich geringeren Membranfläche installiert werden kann.

Obwohl es sich jeweils um Talsperrenwässer handelte, wurden gegensätzliche Erkenntnisse erzielt. Das im letzte-

ren Fall (Tabelle 12) beschriebene UF-System war bei den Untersuchungen am ersten Standort nicht erprobt worden. Demgegenüber ließ sich mit dem im ersten Fall, nun zur Realisierung kommenden UF-System im zweiten Fall mit dem unbehandelten Talsperrenwasser kein stabiler Betrieb erreichen.

Dies macht erneut die Notwendigkeit der Durchführung von Pilotversuchen deutlich, insbesondere bei der Aufbereitung von Oberflächenwässern, die Inhaltsstoffe, wie beispielsweise Mangan, Algen und Huminstoffe enthalten, welche die Leistungsfähigkeit von Membranfiltrationsverfahren deutlich beeinflussen.

## 6.4 Nanofiltration zur Teilenthärtung und Teilentsalzung

Der Betrieb von NF-Anlagen erfordert häufig die Zugabe von Aufbereitungsstoffen zur Vermeidung von Ablagerungen durch schwerlösliche Salze. Anstelle von Mineralsäuren wird in einigen Anlagen Kohlensäure zur Absenkung des pH-Wertes eingesetzt [20]. Sofern die Anlagen mit vergleichsweise geringen Ausbeuten betrieben werden und die Rohwässer nicht zu stark mineralisiert sind, kann ein Ausfall von Karbonaten durch Übersättigung vermieden werden. Einige Anlagen mit Durchsatzmengen zwischen 2 und 30 m<sup>3</sup>/h weisen unter diesen Bedingungen bereits seit mehreren Jahren einen stabilen Betrieb auf. Es besteht dabei die Möglichkeit einer problemlosen Ableitung der Konzentrate in die jeweiligen Vorfluter, sofern außer CO<sub>2</sub> keine Aufbereitungsstoffe zugesetzt werden. Bei einer Anlage (30 m<sup>3</sup>/h) beträgt die Zugabemenge an Kohlensäure beispielsweise 300 g/m<sup>3</sup>, wobei sich bei einer Ausbeute von 80 % die in Tabelle 13 aufgeführte Wasserbeschaffenheit mit den angegebenen Rückhaltgraden ergibt.

Durch Behandlung des Rohwassers im Vollstrom wird die Härte von 23 auf 9°dH vermindert. Gleichzeitig erfolgt eine gewisse Teilentsalzung, wobei insbesondere Sulfat eliminiert wird.

Enthält ein Wasser neben den Härtebildnern auch erhöhte Gehalte an Sulfat oder Silikat, ist für einen problemlosen Betrieb einer NF-Anlage die Zugabe eines Antiscalantmittels erforderlich. Die Zugabemengen liegen dabei in der Größenordnung von ca. 2 bis 8 g/m<sup>3</sup>. Bei Ausbeuten zwischen 75 und 90 % reichern sich die Aufbereitungsstoffe im Konzentrat maximal um den Faktor 4 bis 10 an. Dies gilt im Übrigen für alle von den NF-Membranen zurückgehaltenen Wasserinhaltsstoffe. Bei der Entsorgung der anfallenden Konzentrate sind daher stets die überhöhten Salz- und Phosphatgehalte zu beachten. Dies schränkt unter Umständen die Anwendungsmöglichkeiten von NF/UO in der öffentlichen Trinkwasserversorgung ein und ist als einer der Gründe dafür anzusehen, weshalb in Deutschland bislang nur wenige Anlagen dieser Art im Einsatz sind.

**Tabelle 12.** Einfluss der Vorbehandlung bei der Aufbereitung von Talsperrenwasser mittels UF.

Aufbereitung von Talsperrenwasser mit UF		ohne Vorb.*	mit Vorb.*
Flächenbelastung	l/m <sup>2</sup> /h	60	150
Filtrationszyklus	min	30	120
Ausbeute	%	94	98
Verfügbarkeit	%	89	98
Intervall für Einsatz von Reinigungschemikalien	h	36	168
Spez. Chemikalienbedarf (ohne Neutralisation)			
Natronlauge	g/m <sup>3</sup>	8,8	0,7
Natriumhypochlorit	g/m <sup>3</sup>	3,7	–
Schwefelsäure	g/m <sup>3</sup>	2,0	–
Zitronensäure	g/m <sup>3</sup>	13,3	1,0

**Tabelle 13.** Veränderung der Wasserbeschaffenheit durch NF zur Teilenthärtung.

	Rohwasser	Ablauf NF	Rückhalt, %
Calcium	g/m <sup>3</sup>	102	53
Magnesium	g/m <sup>3</sup>	39	8,1
Härte	°dH	23,2	9,3
Hydrogenkarbonat	mol/m <sup>3</sup>	7,34	4,0
Sulfat	g/m <sup>3</sup>	28	1,2
Chlorid	g/m <sup>3</sup>	20	14
Nitrat	g/m <sup>3</sup>	12	10
S1 (DIN 50930)	–	0,16	0,10

## 6.5 Umkehrosmose zur Chloridentfernung

Ein hartes und stark chloridhaltiges Brunnenwasser, dessen Selenkonzentration über dem Trinkwassergrenzwert liegt, soll in stärkerem Umfang zur Trinkwasserversorgung genutzt werden. Um einerseits die gesetzlichen Vorgaben gemäß TrinkwV [5] zu erfüllen und andererseits Korrosionserscheinungen im Leitungsnetz aufgrund des hohen Salzgehaltes zu vermeiden, ist im vorliegenden Fall eine Entsalzung erforderlich. Als Ergebnis einer Vorstudie, die auch halbtechnische Untersuchungen beinhaltete, wurde die UO ausgewählt. Die Versuche wurden mit Ausbeuten von 75 bis 80 % und einem Druck von ca. 10 bar unter Zugabe von CO<sub>2</sub>-Gas sowie Phosphatlösung (Antiscalant) durchgeführt [16].

Auf der Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Verfahrenskonzept für die neue Aufbereitungsanlage ausgearbeitet, das schematisch in Bild 3 dargestellt ist.

Das Brunnenwasser wird im Teilstrom über die UO-Anlage geführt. Ein weiterer Teilstrom des Rohwassers wird zur Entmanganung einem Quarzsandfilter zugeführt. Ein Teilstrom des Permeates wird über Calciumcarbonatfilter aufgehärtet. Die drei Teilströme werden gemischt und gemeinsam mechanisch entsäuert. Damit gelingt es, eine aus korrosionschemischer Sicht einwandfreie Trinkwasserbeschaffenheit bereitzustellen. Der Nachweis wurde durch Korrosionsversuche an einer Testapparatur erbracht.

Im vorliegenden Fall wurde vom Versorgungsunternehmen nach Betrachtung ökonomischer und ökologischer Gesichtspunkte sowie auch politischer Aspekte der Entsalzung mittels Umkehrosmose gegenüber dem Bezug von Fremdwasser der Vorzug gegeben.

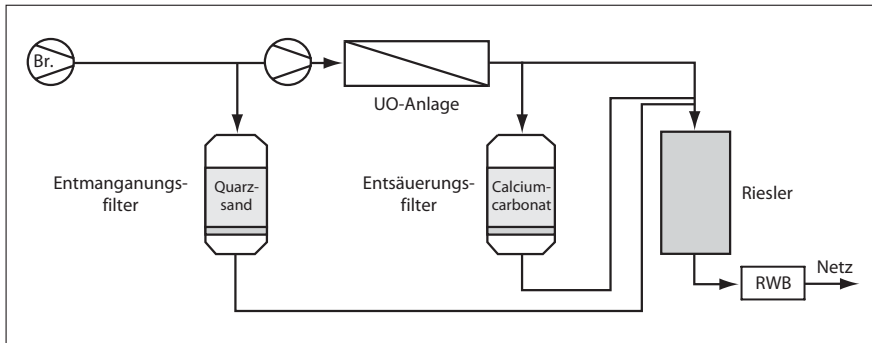


Bild 3. Schema einer Teilentsalzung.

## 7. Überwachung der Aufbereitungswirksamkeit

Zur Überwachung der Wirksamkeit von MF/UF-Anlagen kommen in der Praxis diejenigen Methoden in Betracht, die sich bereits bei der Überwachung konventioneller Filteranlagen bewährt haben. Hierbei handelt es sich in erster Linie um die kontinuierliche Trübungsmessung, wobei auch vereinzelt Anlagen zusätzlich mit Partikelmessgeräten ausgestattet sind.

Aufgrund des sehr weitgehenden Partikelrückhaltes der MF/UF liegen in den Filtraten Trübungswerte  $< 0,05$  FNU sowie Partikelgehalte  $< 5$  pro ml im Größenbereich 1–100  $\mu\text{m}$ , d. h. Werte im Bereich der Bestimmungsgrenze vor [9]. Bei der kontinuierlichen Partikelmessung ist der störende Einfluss der regelmäßigen Spülung der Membranen auf das Messergebnis zu berücksichtigen. Da ein Membranmodul aus mehreren Tausend Einzelfasern besteht, können Membrandefekte durch Erfassung der Trübung oder durch Partikelmessung nur dann erkannt werden, sofern im Rohwasser hohe Partikel- und Trübstoffgehalte vorliegen, wie dies im Allgemeinen in der Praxis nicht der Fall ist. Bei einer seit 1999 in Betrieb befindlichen UF-Anlage schwanken beispielsweise die Partikelgehalte im Rohwasser in der Größenordnung zwischen 1000 und 5000 Partikel pro ml. Die Integrität

der Membranen wird in jährlichen Abständen durch Anwendung eines sogenannten Blasentest überprüft, bei dem die Membranmodule einzeln untersucht werden. Nach einer Betriebszeit von zwölf Monaten wurden 11 defekte Fasern, nach zwei Jahren 2 und nach vier Jahren weitere 31 defekte Fasern von insgesamt 440 000 Fasern ermittelt. Ein messbarer Partikelanstieg tritt nach dem in Bild 4 dargestellten Zusammenhang bei einer angenommenen Partikelanzahl von 10 000 pro ml im Rohwasser bei mehr

als 3 defekten Fasern auf. Sind dagegen nur 2000 Partikel pro ml im Rohwasser enthalten, müssen gleichzeitig mindestens 15 Fasern einen Defekt aufweisen, um einen messbaren Partikelanstieg zu detektieren. Bei dieser Betrachtung wird unterstellt, dass sämtliche Fasern gleichmäßig durchströmt werden.

Zur Überprüfung der Integrität von MF/UF-Anlagen besteht jedoch die Möglichkeit, den Partikelgehalt im Zulauf zu erhöhen bzw. ein Messgerät einzusetzen, das Partikel in einem kleineren Größenbereich, z. B. bis 0,1–0,2  $\mu\text{m}$  erfassen kann [3; 10]. Dies ist jedoch mit einem größeren gerätetechnischen Aufwand verbunden.

Die meisten großtechnischen Anlagen sind aufgrund der oben dargestellten Problematik nicht mit Partikelmessgeräten, sondern mit einer Vorrichtung für einen automatischen Druckhaltetest ausgestattet. Für diesen Test werden die Anlagen blockweise außer Betrieb genommen, mit Druckluft beaufschlagt und der Druckabfall innerhalb weniger Minuten ermittelt. Bei einem merklichen Druckabfall ist von einem Membrandefekt auszugehen. Um das kompromittierte Modul aus einem Block von mehreren Modulen selektieren zu können, muss der Druckhaltetest an den einzelnen Modulen durchgeführt werden. Der Defekt kann dadurch behoben werden, dass das Modul aus dem Block entnommen, geöffnet und defekte Fasern mit einem Kunststoffpin verschlossen werden. Die so verschlossenen Fasern stehen nicht mehr für den Filtrationsbetrieb zur Verfügung. Bis zu einem Prozent verschlossene Fasern werden in einem Modul geduldet, bevor ein Austausch erforderlich wird. Eine zu häufige Durchführung von Druckhaltetests ist nicht zu empfehlen, da sie eine Schädigung der Membranen verursachen kann.

NF/UF-Anlagen werden demgegenüber durch kontinuierliche Messung der elektrischen Leitfähigkeit im Permeat überwacht. Bei Überschreitung eines vorgegebenen Wertes liegt eine Membranschädigung vor. Da eine Reparatur bei Spiralwickелеlementen nicht möglich ist, müssen die beschädigten NF/UF-Membranelemente ersetzt werden.

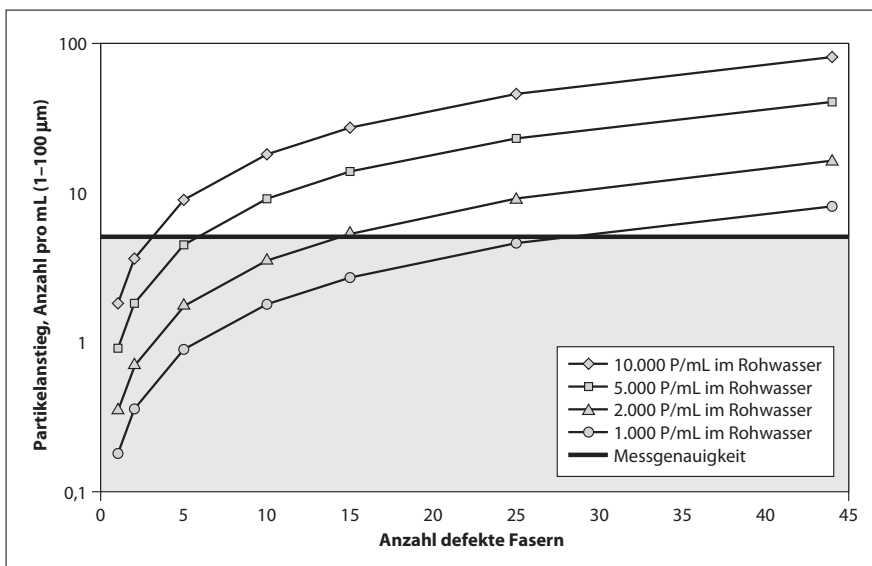


Bild 4. Anstieg des Partikelgehaltes verursacht durch defekte Fasern.

## 8. Technische Grenzen

In Bezug auf die Einsatzbereiche von Membranfiltrationsverfahren bestehen Beschränkungen vor allem hinsichtlich der Beschaffenheit des aufzubereitenden Rohwassers.

Aufgrund der Modulkonfiguration sind bei Wickelmodulen (NF/UF) besondere Anforderungen an die Beschaffenheit des Zulaufwassers hinsichtlich des Feststoffgehaltes zu stellen. Häufig herangezogener Parameter ist der Kolloidindex, der auch SDI (silt density index) genannt wird. Wird ein Wert von 3%/min überschritten, ist eine Vorbehandlung zur Verminderung des Feststoffgehaltes vorzuschalten. Zusätzlich werden einer NF/UF-Anlage mechanische Vorfilter vorgeschaltet, um Sandpartikel abzutrennen, die in den Membranmodulen zu Verblockungen führen könnten [16].

Vermieden werden muss in jedem Fall eine Oxidation gelöster Substanzen wie beispielsweise Eisen oder Mangan innerhalb der Membran, da dies zu einer Verminderung der Durchsatzleistung führt. Die Filtration eisen- und manganhaltiger Wässer kann gegebenenfalls unter Sauerstoffabschluss erfolgen. Ansonsten müssen Eisen und Mangan bereits vor der Membrananlage filtrativ entfernt worden sein. Dies gilt gleichermaßen für NF/UF- wie für MF/UF-Anlagen.

Ein ganz wesentlicher die Permeabilität von Membranen beeinflussender Faktor ist der Gehalt an gelösten organischen Wasserinhaltsstoffen, beispielsweise erfassbar über den DOC bzw. den spektralen Absorptionskoeffizienten bei 254 nm (SAK-254). Hohe DOC- bzw. SAK-254-Werte verursachen erfahrungsgemäß eine schnellere Zunahme des Transmembrandrucks. Sofern im abgegebenen Trinkwasser ein DOC-Wert kleiner 1–2 mg/l angestrebt wird, können bei MF/UF-Membranen durch Zugabe von Flockungsmitteln vor der Membran unter Umständen eine Fällung der Huminstoffe und damit Vorteile im Betrieb erzielt werden [21; 22].

Calcitabscheidende Wässer können zu unerwünschten Ablagerungen in der Membran führen und eine Erhöhung des TMP bedingen. Bei der Aufbereitung solcher Wässer durch MF/UF ist in jedem Fall mit einem erhöhten Spül- und Reinigungsaufwand zu rechnen. Bei Einsatz von NF/UF-Membranen muss ein ausreichend niedriger pH-Wert im Rohwasser eingestellt werden.

Einsatzgrenzen ergeben sich auch hinsichtlich des Spülwasserbedarfes bzw. des Konzentratanfalls. Steht nur ein begrenztes Wasserdargebot zur Verfügung, kommt unter Umständen ein Verfahren mit erhöhtem Abwasseranfall nicht in Betracht. Eine problemlose Ableitung der anfallenden Schlammwässer bzw. Konzentrate muss möglich sein.

Eine wesentliche Voraussetzung für Anlagen, insbesondere an schlecht zugänglichen Standorten ist ein einfacher und weitestgehend automatischer Betrieb sowie die Möglichkeit der Fernüberwachung.

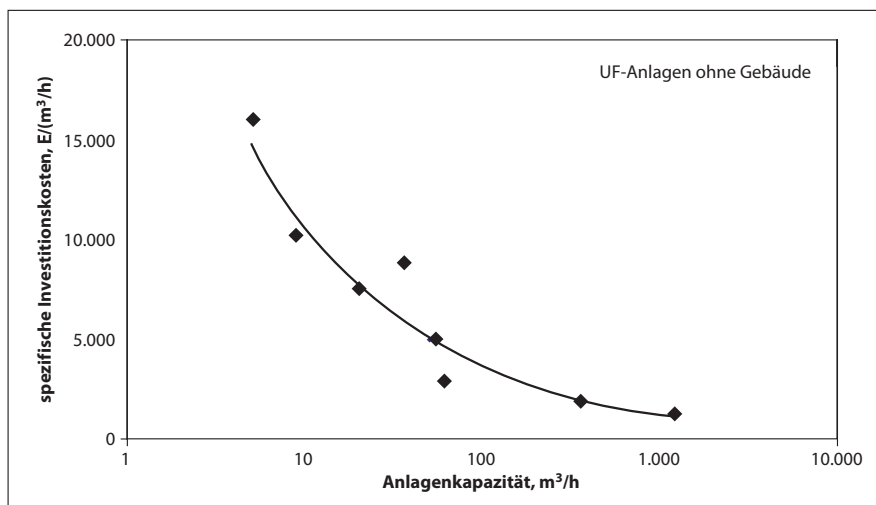
Beim Betrieb von NF/UF-Anlagen kommt es zur Anreicherung der von den Membranen zurückgehaltenen Stoffe im Konzentrat. Beispielsweise kann beim Einsatz der UF der Gehalt an Mikroverunreinigungen im Konzentrat erhöht sein, sodass eine Ableitung in den Vorfluter erschwert wird. Dies ist unter Umständen auch bei der Behandlung uranhaltiger Wässer zu beachten.

Der dauerhafte Einsatz von Chemikalien zur Aufrechterhaltung der Durchlässigkeit von Membranen ist ein Aspekt, der der Zielvorgabe entgegensteht, weitestgehend naturnahe Verfahren bei der Trinkwassergewinnung einzusetzen, wie es beispielsweise das IAWR-Memorandum fordert [23].

## 9. Kostenaspekte

Bei der Planung von MF/UF-Membranfiltrationsanlagen ist zu entscheiden, auf welche Nennleistung die Anlage auszuliegen ist und mit welcher Durchsatzmenge sie im Mittel betrieben wird. Aus der beispielsweise in einer Pilotphase ermittelten, bei der vorliegenden Rohwasserbeschaffenheit erreichbaren Flächenbelastung ergibt sich die erforderliche Membranfläche. Wie in *Bild 5* dargestellt ist, liegen die spezifischen Investitionskosten für MF/UF-Anlagen abhängig von der Durchsatzmenge für kleine Anlagen, die nur mit einem Modul ausgestattet sind (5 m<sup>3</sup>/h), bei 16 000 € pro m<sup>3</sup>/h und Anlagen größer 400 m<sup>3</sup>/h unter 2000 € pro m<sup>3</sup>/h. Dabei wird der gleiche Ausrüstungsstandard der Anlagen unabhängig von ihrer Durchsatzleistung vorausgesetzt.

Aus *Bild 5* resultiert eine klare Kostendegression mit steigender Anlagengröße. Der Anteil der Membranmodule an den Gesamtkosten liegt dabei in der Größenordnung von 10%.



**Bild 5.** Spez. Investitionskosten für UF-Anlagen.

In jüngster Vergangenheit werden insbesondere Anlagen mit kleinerer Durchsatzmenge angeboten, die einen geringeren Automatisierungsgrad und eine vereinfachte MSR-Technik aufweisen und ohne die Möglichkeit einer automatischen Reinigung konzipiert sind. Die Module sind nach Erreichen eines vorgegebenen maximalen Transmembrandruckes vom Hersteller auszutauschen und im Werk einer chemischen Reinigung und Integritätskontrolle zu unterziehen. Daraus resultieren deutlich geringere Investitionskosten bei etwas höheren Betriebskosten.

Die spezifischen Betriebskosten setzen sich zusammen aus den Kosten für die Abschreibung der Anlagentechnik, den Membranersatz, den Energiebedarf, den Personalaufwand für Betrieb, Überwachung und Wartung sowie den Chemikalienbedarf und gegebenenfalls die Abwasserentsorgung.

Die Kosten für den Membranersatz sind direkt proportional zur installierten Membranfläche und liegen in der Größenordnung von 25 bis 75 € pro m<sup>2</sup> Membranfläche für die verschiedenen MF/UF-Membransysteme, wobei inzwischen Membranstandzeiten von 7 bis 10 Jahren angenommen werden.

Für NF/UO-Anlagen liegen die Investitionskosten um den Faktor 2 höher im Vergleich zur MF/UF, die Membranersatzkosten demgegenüber im Bereich von 20 bis 30 € pro m<sup>2</sup> Membranfläche. Die Standzeiten werden üblicherweise mit

**Tabelle 14.** Spezifische Aufbereitungskosten (€ pro m<sup>3</sup> Trinkwasser).

MF	UF	NF	UO	Literatur	Jahr
–	–	0,41	–	[24]	1996
–	0,15–0,25	–	–	[25]	1998
–	0,11	–	–	[26]	1999
–	–	0,23	–	[27]	2002
0,11	0,23	–	–	[28]	2003
–	0,15–0,20	–	–	[29]	2003
–	–	0,30 – 0,50	–	[20]	2003
0,10–0,30	0,10–0,30	0,30–0,50	0,50–1,00	[3]	2003
–	0,14	–	–	[10]	2003
–	–	0,20–0,30	–	[15]	2004
–	–	0,17	0,35–0,45	[16]	2004

3 bis 5 Jahren angegeben, wobei die in der UO-Anlage in Duderstadt eingesetzten Hohlfasern bereits seit 20 Jahren ohne Leistungsverlust in Betrieb sind.

Als Personalaufwand für Betrieb und Überwachung von Membranfiltrationsanlagen ist maximal 1 Stunde arbeits-tätiglich anzusetzen, da diese Anlagen weitgehend automatisch laufen.

Da die Kostenbetrachtung sehr stark von den jeweiligen Randbedingungen im Einzelfall abhängt, sind in der *Tabelle 14* beispielhaft Angaben aus der Literatur über spezifische Betriebskosten verschiedener Anlagen zusammengestellt.

Die Literaturangaben aus den Jahren 1996 bis 2004 sind in *Tabelle 14*

chronologisch aufgeführt, woraus eine tendenzielle Abnahme der Kosten mit der Zeit zu beobachten ist. Bei den Angaben handelt sich um Kostenschätzungen für Anlagen mit einer Nennleistung im Bereich von 10 bis 250 m<sup>3</sup>/h. Aufgrund der zunehmenden Anzahl der Membranfiltrationsanlagen in der öffentlichen Trinkwasserversorgung wird sich dieser Trend noch weiter fortsetzen.

## 10. Ausblick

Membranfiltrationsverfahren gewinnen in der öffentlichen Trinkwasserversorgung zunehmend an Bedeutung. Dabei werden Mikro- und Ultrafiltrationsanlagen zur Entfernung von Partikeln, Nanofiltrations- und Umkehrosroseanlagen zur Entfernung gelöster Inhaltsstoffe eingesetzt. Abhängig von der jeweils vorliegenden Rohwasserbeschaffenheit und der Aufgabenstellung ist die geeignete Verfahrenstechnik zu wählen. Entscheidend für die Auswahl sind dabei neben technischen vor allem auch wirtschaftliche Gesichtspunkte.

Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserbeschaffenheit sind aufgrund der verschärften Anforderungen gemäß Trinkwasserverordnung 2001 insbesondere bei der Nutzung mikrobiell belasteter und trübstoffhaltiger Rohwässer stets erforderlich. Dabei stellt die Aufbereitung eine der Möglichkeiten innerhalb des Multibarrierensystems dar. Seit zur Partikelentfernung Mikro- und Ultrafiltrationsanlagen eingesetzt werden, besteht eine stetige Weiterentwicklung der zum Einsatz kommenden Systeme hinsichtlich der Membranmaterialien, der Betriebsweise sowie der Vorgehensweise beim Spülen und Reinigen der Membranen. Ziel weiterer F & E-Arbeiten sollte insbesondere im Hinblick auf die Entsorgung der anfallenden schlammhaltigen Wässer aus Kostengründen und die Minimierung des Spülwasser- und Chemikalienverbrauchs sein, was durch verschiedene Maßnahmen gelingen kann. Beispielsweise können Membranen, die mit geringerer Flächenbelastung betrieben werden längere Standzeiten erreichen. Dies hätte zwar bei der Anlagenauslegung zwangsläufig eine größere zu installierende Membranfläche und damit einen höheren Investitionsauf-

wand zur Folge, langfristig gesehen kann aber durchaus ein wirtschaftlicherer Betrieb resultieren, da die Membranen aufgrund der geringeren Belastung weniger häufig unter Zugabe von Chemikalien gespült und gereinigt werden müssen. Andererseits kann durch Entwicklung von Membranen aus alterungsbeständigeren und chemisch stabileren Materialien deren Standzeiten verlängert und dadurch die Kosten für den Membranersatz, der noch immer einen wesentlichen Kostenfaktor darstellt, vermindert werden. Neben wirtschaftlichen Aspekten gewinnt im Zusammenhang mit dem Betrieb von MF/UF-Anlagen die Überwachung der Membranintegrität an Bedeutung. Dringend erforderlich ist hierbei die Erarbeitung praktikabler Überwachungsmethoden, die bei häufiger Anwendung zu keiner Schädigung der Membranen führen und dennoch so präzise sind wie der bisher eingesetzte Druckhaltetest.

Im Gegensatz zu den MF/UF-Verfahren werden NF und UO in deutlich geringerem Umfang zur Trinkwasseraufbereitung beispielsweise bei der zentralen Teilenthärtung bzw. -entsalzung von Trinkwässern eingesetzt. Ein Zwang zur Teilentsalzung kann unter Umständen bei der Verteilung von Wässern unterschiedlicher Beschaffenheit bestehen. Die eingeschränkte Nutzung der NF und UO liegt vor allem darin begründet, dass die Entsorgung der anfallenden Konzentrate nicht immer kostengünstig erfolgen kann. Ziel weiterer F & E-Arbeiten im Zusammenhang mit dem Betrieb von NF- und UO-Anlagen sollte daher deren Optimierung vor allem im Hinblick auf die Minimierung der anfallenden Konzentratmengen und die Verminderung der Zugabemengen an Zusatzstoffen sein.

## Literatur

- [1] Baldauf, G.: Optimierung von Aufbereitungstechniken. GWF-Wasser/Abwasser 145 (2004) Nr. 13, S. 69–81.
- [2] Lipp, P.: Membranfiltrationsverfahren in der öffentlichen Wasserversorgung, ATV-DVWK-DVGW-Membrantage Kassel, 22.–24.06.2004.
- [3] Gimbel, R. und Hagemeyer, G.: Anforderungen an die Membrantechnik in der Trinkwasseraufbereitung, Begleitbuch zur 5. Aachener Tagung (2003), Ü3.
- [4] DVGW-Arbeitsblatt W 213-5, Filtrationsverfahren zur Partikelentfernung bei der Wasseraufbereitung; Teil 5 Membranfiltration, Ausgabe 05/2003.
- [5] Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21. Mai 2001. BGBl. I, Nr. 24, (2001), S. 959–980.
- [6] Lipp, P.; Witte, M. und Baldauf, G.: Erfassung des Langzeitverhaltens von Ultrafiltrationsmembranen am Beispiel der ersten großtechnischen Anlage zur Aufbereitung eines Quell- und Talsperrenwassers unter verschiedenen Betriebsbedingungen sowie unter Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher und ökologischer Aspekte. Abschlussbericht zum DVGW-Forschungsvorhaben W 34/99 (2003).
- [7] Lipp, P.: Membrantechnik zur Aufbereitung von mikrobiell belastetem Wasser. 37. Essener Tagung (2004), 57.
- [8] Lipp, P.: Langzeiterfahrungen beim Betrieb der UF-Anlage zur Trinkwasseraufbereitung der Verbandsgemeinde Hermeskeil. DVGW energie | wasser-praxis 05/2004, S. 44–45.
- [9] Lipp, P.: Behandlung mikrobiell belasteter Wässer – Membranfiltration. TZW-Schriftenreihe Bd. 25 (2004), S. 89–101.
- [10] Urban, F.; Simon, I. und Schwarberg, J.: Ultrafiltration im Wasserwerk Sorpe, GWF-Wasser/Abwasser 144 (2003) Nr. 11, S. 749–756.
- [11] Lipp, P. und Baldauf, G.: Erfahrungen zum Einsatz der Membranfiltrationstechnik bei der Trinkwasseraufbereitung in Deutschland. gwa 80 (2000) Nr. 1, S. 37–44.
- [12] Lipp, P.; Oehler, E. und Becker, A.: Einsatz eines offenen, rohwasserseitig mit Luft gespülten Ultrafiltrationssystems zur Partikelentfernung aus einem mikrobiologisch beeinträchtigten Quellwasser, Begleitbuch zur 4. Aachener Tagung (2001), W11.
- [13] DVGW Wasserinformation 29, Zentrale Enthärtung von Trinkwasser, Ausgabe 7/1991.
- [14] Hillenbrand, T.; Böhm, E.; Kotz, C.; Schikorra, V.; Schleich, J.; Hesse, S. und Baldauf, G.: Zentrale Enthärtung von Trinkwasser – Eine ökologische und ökonomische Bewertung. Fraunhofer IRB Verlag 2004, ISBN 3-8167-6477-0.
- [15] Hesse, S.; Baldauf, G.; Böhm, E. und Hillenbrand, T.: Ökologische und ökonomische Aspekte einer zentralen Enthärtung von Trinkwasser. DVGW energie | wasser-praxis 05/2004, S. 46–49.
- [16] Lipp, P.: Erfahrungen mit Nanofiltration und Umkehrosiose. Tagungsband der Gemeinschaftstagung von ATV-DVWK und DVGW-Membrantage, 22.–24. Juni 2004, Kassel.
- [17] Holy, A.; Urban, F.; Dautzenberg, W.; Sous, P.; Ohligschläger, J. und Hagemeyer, G.: Planung einer UF-Anlage mit einer Leistung von 6000 m<sup>3</sup>/h zur Trinkwasseraufbereitung im WW Roetgen, Begleitbuch zur 5. Aachener Tagung (2003), W23.
- [18] UBA: Anforderungen an die Aufbereitung von Oberflächenwässern zu Trinkwasser im Hinblick auf die Eliminierung von Parasiten. Gesundheitsbl. 12 (1997), S. 484–485.
- [19] DVGW-Arbeitsblatt W 290, Trinkwasserdesinfektion – Einsatz- und Anforderungskriterien, Ausgabe 2/2005.
- [20] Wunsch, M. und Nagel, R.: Nanofiltration zur Teilenthärtung von Trinkwasser. Begleitbuch zur 5. Aachener Tagung (2003), W9.
- [21] Hagemeyer, G.; Dautzenberg, W.; Sous, P.; Ohligschläger, J. und Gimbel, R.: Optimierung der Flockung hinsichtlich der Erfordernisse einer nachgeschalteten Ultrafiltration am Beispiel der großtechnischen Pilotanlage Roetgen, Begleitbuch zur 5. Aachener Tagung (2003), W2.
- [22] Berg, P.: Innovative Ultrafiltrationstechnologie für Membranen, Module und ihren Betrieb, Begleitbuch zur 5. Aachener Tagung (2003), W8.
- [23] IAWR: Grundwasser-Memorandum 2004 <http://www.dvgw.de/wasser/rechtsvorschriften/grundwassermemorandum.html>
- [24] Lipp, P. und Baldauf, G.: Nanofiltration in Combination with Limestone Filtration for Treating a Soft Spring Water Containing High Amounts of Humic Substances, Acta hydrochimica et hydrobiologica 24 (1996) Nr. 6, S. 267–276.
- [25] Rautenbach, R. und Voßenkaul, K.: Wirtschaftliche Perspektiven der Membranfiltration in der Trinkwasseraufbereitung, Begleitbuch zur 2. Aachener Tagung (1998), A18.
- [26] Lipp, P.; Baldauf, G.; Schmitt, A. und Theis, B.: Trinkwasser aus Talsperren – Erste Erfahrungen zum Betrieb der großtechnischen UF-Anlage der Verbandsgemeinde Hermeskeil, In: IWW (Hrsg.), BMBF-Statusseminar in Roetgen 10.11.99; Berichte aus dem Rheinisch-Westfälischen Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH (IWW), Bd. 28, Mülheim, Eigenverlag, 1999, S. 43–56.
- [27] Gorenflo, A.; Velázquez-Padrón, D. and Frimmel, F.H.: Nanofiltration of a German groundwater of high hardness and NOM content: performance and costs, Desalination 151 (2002), S. 253–265.
- [28] Rhode, K.: Membranfiltration, Trinkwasserkolloquium der badenova AG & CO. KG am 21.11.03 in Offenburg.
- [29] Herb, S. und Krause, S.: Ultrafiltration für kleine Wasserwerke, gwa 83 (2003) Nr. 6, S. 419–424.