

# Sulfathaltige Grundwässer durch Nanofiltration nutzbar machen

– aerobe und anaerobe Verfahrensvarianten

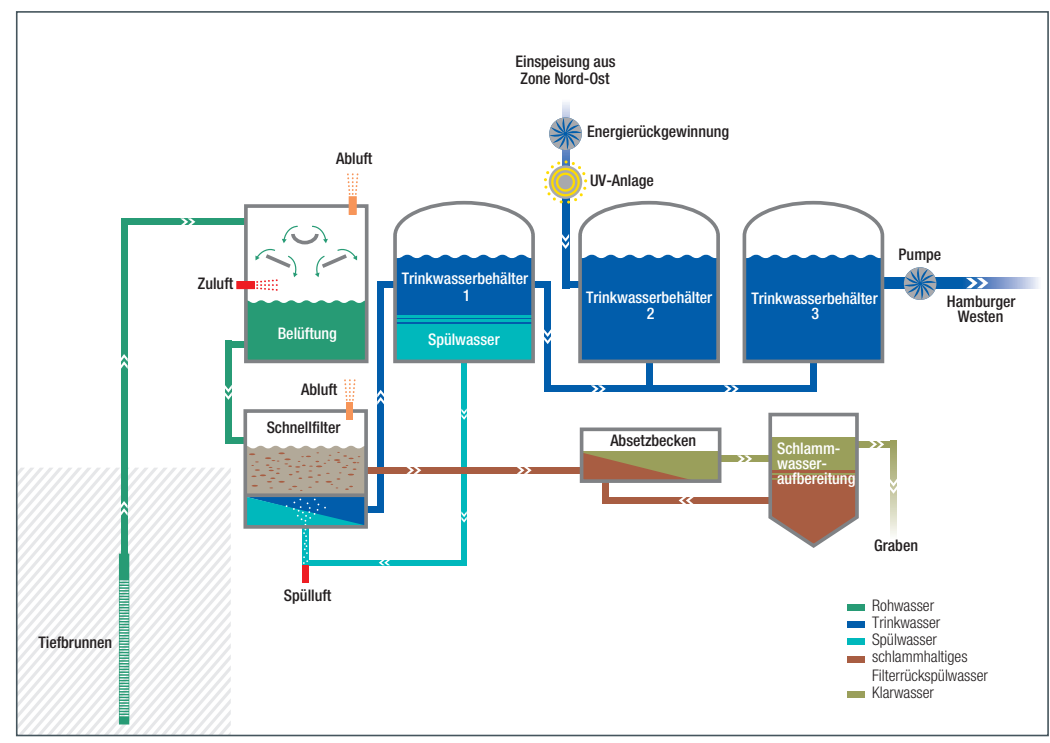
Aufgrund von wachsenden Einwohnerzahlen steigt der Trinkwasserbedarf der Stadt Hamburg, des Weiteren auch die Spitzenabgaben während Hitzeperioden. **Teilversalzene und stark sulfathaltige Grundwässer**, wie sie z. B. im Wasserwerk Hamburg-Stellingen vorkommen, können aktuell jedoch nur begrenzt genutzt werden, um die Trinkwasserproduktion in der Hansestadt zu steigern. In dem genannten Wasserwerk werden daher im laufenden BMWi-Projekt SULEMAN **verschiedene Verfahrensvarianten der Nanofiltration** zur Entfernung von Sulfat getestet. Der Beitrag stellt vor diesen Hintergrund Ergebnisse der anaeroben Behandlung von Brunnenwasser und der aeroben Behandlung von Reinwasser mittels Nanofiltration gegenüber, ergänzt durch die Ergebnisse von Versuchen **mit einer neuartigen beschichteten Membran**. Ein Ausblick auf die weiteren Projektarbeiten rundet den Beitrag ab.

von: Dorothea Mergel, Sebastian Ernst, Elena Jacki, Lynn Massaki Claasen (alle: HAMBURG WASSER), Jakob Stumme & Dr.-Ing. Barbara Wendler (beide: DVGW-Forschungsstelle TUHH)

Der **Trinkwasserbedarf** der Stadt Hamburg steigt aufgrund wachsender Einwohnerzahlen, ferner auch die Spitzenabgaben während der häufiger werdenden Hitzeperioden. Bis ins Jahr 2030 rechnen die Verantwortlichen deshalb mit einem Anstieg des Jahreswasserbedarfs in der Größenordnung von 2 bis 6 Prozent im Vergleich zu 2017 [1].

In 2018 wurden an insgesamt 21 Tagen mehr als 400.000 m<sup>3</sup> Trinkwasser an die Kunden im Stadtgebiet der Hansestadt abgegeben, während es im Zeitraum zwischen 2007 und 2017 lediglich sieben solcher Spitzenabgabe-Tage gab. Diese Zahlen zeigen deutlich, wie sich die Häufigkeit wie auch die Dauer von Hitzeperioden in den letzten zehn Jahren auf den Wasserverbrauch ausgewirkt haben.

Abb. 1: Fließschema des Wasserwerks Stellingen



Quelle: HAMBURG WASSER

Um den steigenden Bedarf langfristig decken zu können, werden derzeit Möglichkeiten zur ressourceneffizienten Erhöhung der Trinkwasserproduktion untersucht. Erhöhte Salzkonzentrationen in Tiefengrundwässern limitieren eine Steigerung der Trinkwasserproduktion. Zu nennen sind hier u. a. hohe Sulfatkonzentrationen in Brunnenwässern des Wasserwerks Stellingen. Die Nanofiltration kommt als Ergänzung zu den bestehenden Aufbereitungsschritten im Wasserwerk infrage, um Salze aus dem geförderten Grundwasser (Rohwasser) zu entfernen.

Hintergrund und Ausgangssituation ist, dass im Wasserwerk Stellingen die Sulfatkonzentration des aufbereiteten Wassers oberhalb des gesetzlichen Grenzwerts der Trinkwasserverordnung (TrinkwV) von 250 Milligramm pro Liter (mg/l) liegt. Um den Grenzwert für Sulfat sicher zu unterschreiten, wird das aufbereitete Wasser aus dem Wasserwerk deshalb derzeit mit Trinkwasser aus der Hamburger Versorgungszone Nord gemischt. Eine Sulfatentfernung im Teilstrom mittels Membrantechnik könnte das Werk langfristig unabhängig von dieser Vermischung machen und die Nutzung weiterer teilversalzener/sulfathaltiger Brunnenwässer zur Steigerung der Trinkwasserproduktion ermöglichen. Vor diesem Hintergrund untersucht HAMBURG WASSER zusammen mit weiteren Partnern im laufenden BMWi-Verbundprojekt SULEMAN (vollständiger Projekttitel: Aufbereitung von Grundwässern mit erhöhten Sulfatgehalten: Innovative Optionen und Grenzen eines ressourcen- und insbesondere energieeffizienten Trinkwassermanagements), mit welchen Behandlungsverfahren die Sulfatentfernung im Rahmen der Grundwasseraufbereitung energie- und kosteneffizient realisiert werden kann.

Ziel des Projektes ist es, auf Basis der Versuchsergebnisse Handlungsempfehlungen für die ressourcen- und energieeffiziente Aufbereitung von Rohwässern mit erhöhten Sulfatgehalten für die deutsche Wasserversorgung bereitzustellen. Hierzu werden modifizierte Kapillarmembranen entwickelt und im Praxistest mit kommerziellen Verfahren verglichen. Alle Verfahrensvarianten werden dabei über ihre Lebenszyklen bewertet.

Für den Standort Stellingen von HAMBURG WASSER werden eine dezentrale Aufbereitung des sulfathaltigen Brunnenwassers mittels anaerober Nanofiltration vor der Enteisung/

**Tabelle 1: Qualität des Zulaufwassers**

Parameter	Zulauf NF anaerob (Brunnenwasser) n = 15	Zulauf NF aerob = Zulauf Kapillar-NF (Reinwasser) n = 6
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [mg/l]	570	288
TOC [mg/l]	0,99	1,15
DOC [mg/l]	0,76	1,01
Fe (gelöst) [mg/l]	0,88	< 0,01
Fe (partikulär) [mg/l]	0,03	< 0,01
Mn (gelöst) [mg/l]	0,3	< 0,01
Gesamthärte [°dH]	37,8	26,2
Karbonathärte [°dH]	9,45	8,20
Leitfähigkeit [µS/cm]	1.578	1.001
pH-Wert [-]	7,73	7,30
Temperatur [°C]	12,3	12,9

Quelle: HAMBURG WASSER

Entmanganung im Wasserwerk, eine zentrale Aufbereitung des im Wasserwerk aufbereiteten Wassers (Reinwasser) mittels aerober Nanofiltration sowie eine zentrale Aufbereitung des Reinwassers mittels der neu entwickelten Ka-

## Wir planen, bauen und betreuen

Ihre Membranfiltrationsanlagen, die Prozesse optimieren, Kosten minimieren und Ressourcen schonen.

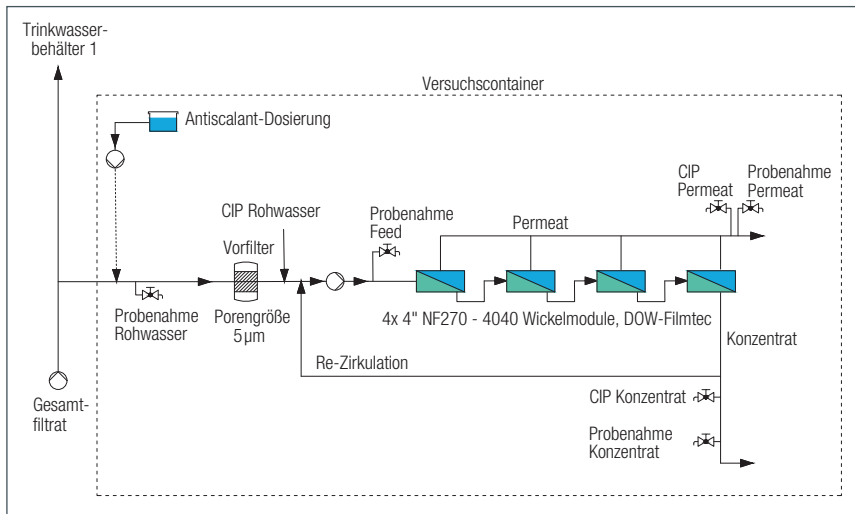
### Innovative Wasseraufbereitung für die Aufgabenbereiche

- Partikelentfernung
- Enthärtung/Entsalzung

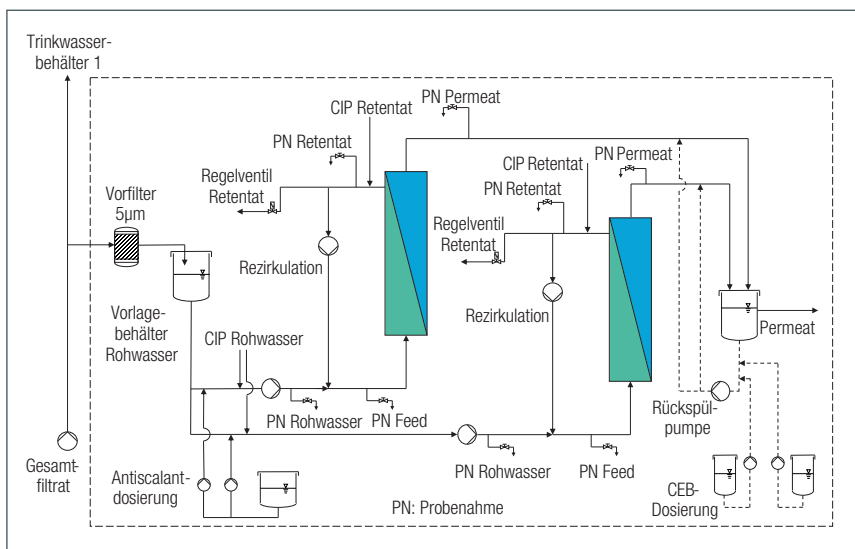
**BREMAG**

Bremer Anlagen GmbH  
T. +49 421 408 982 20  
vertrieb@bremag.de

[www.bremag.de](http://www.bremag.de)



**Abb. 2:** Schema der Versuchsanlage: Nanofiltration aerob; im anaeroben Betrieb wird die Anlage anstelle des Gesamtfiltrats mit Brunnenwasser betrieben (CIP – Anschlüsse für chemische Reinigung)



**Abb. 3:** Schema der Versuchsanlage für die kapillare NF im Wasserwerk Stellingen

pillarmembranen in mehrmonatigen Pilotversuchen getestet. Leistungsfähigkeit und Fouling der Membranen werden bei unterschiedlichen Betriebs-einstellungen (z. B. Ausbeute, Flächenbelastung) ausgewertet.

### Verfahren zur Sulfatentfernung

Die Nanofiltration (NF) ist ein etabliertes Verfahren der Membranfiltration, das in der Trinkwasseraufbereitung zur Enthärtung, Teilentsalzung und Abtrennung von organischen Spurenstoffen eingesetzt wird [2, 3]. Das aufzubereitende Wasser wird dabei mit einem Druck von typischerweise < 10 bar durch eine nanoporöse Membran gedrückt. Die Entfernung von zweiwertigen

Anionen wie Sulfat ist ein typisches Einsatzgebiet der Nanofiltration. Es muss daher nicht die grundsätzliche Machbarkeit, sondern vielmehr die Energieeffizienz der Aufbereitung, z. B. im Vergleich zum Ionenaustausch-Verfahren Carix, sowie die Stabilität der Filtration insbesondere im anaeroben Betrieb geklärt werden. Ein Untersuchungsschwerpunkt liegt daher auf geeigneten Betriebsparametern, der Membranreinigung und dem Einsatz von Antiscalants für den stabilen Langzeitbetrieb.

Neu ist weiterhin der anaerobe Betrieb der Nanofiltration, d. h., das reduzierte Grundwasser wird komplett ohne Luftkontakt über die Nanofiltration

geleitet. Dies ist die Voraussetzung für eine Teilstrombehandlung, z. B. eines besonders hoch sulfathaltigen reduzierten Brunnenwassers. Im reduzierten Grundwasser liegen Eisen und Mangan gelöst vor und das Wasser kann direkt mittels Nanofiltration aufbereitet werden. Bei Luftkontakt fallen Eisen und Mangan aus. Die Ausfällungen müssen vor der Nanofiltration abgetrennt werden, da die Membranmodule ansonsten verblocken.

Die Layer-by-Layer-Technologie (LbL) stellt eine innovative Möglichkeit dar, Membranen zu modifizieren und die Filtrationscharakteristik anzupassen [4]. Die hier modifizierten Kapillarmembranen sind poröse Ultrafiltrations(UF)-Membranen, welche an sich nahezu keinen Rückhalt für zweiwertige Ionen wie Sulfat aufweisen. Für die Modifikation wird eine dünne Filmschicht aus Polyelektrolyten (PE) auf der Membranoberfläche aufgebracht. Hierfür wird die Membran abwechselnd Polykation- und Polyanion-Lösungen ausgesetzt, wodurch sich sukzessive PE an der Oberfläche anlagern. Je nach Anzahl der Schichten und Beschichtungsparametern werden unterschiedliche, angepasste Filtrationscharakteristiken erzielt [5]. Im Rahmen des Projekts wird eine kapillare UF-Membran mit einem NF-Trennverhalten entwickelt, die einen hohen Rückhalt für Sulfat, einen Betrieb bei möglichst geringen Drücken und eine hydraulische Rückspülbarkeit miteinander vereint.

### Versuchsstandort Wasserwerk Stellingen

Im Wasserwerk Stellingen (WW Stellingen), welches im Jahr 1936 in Betrieb gegangen ist, wird das Rohwasser aus zwölf Tiefbrunnen der Fassungen Eidelstedt und Stellingen gefördert und mithilfe von zwei Rieslern und sechs Betonrundfiltern aufbereitet. Das Wasser wird anschließend in die Reinwasserbehälter zur Speicherung geleitet. Zusätzlich wird aus dem Bereich Nord Trinkwasser in den Behälter geleitet und mit dem Stellingener Wasser vermischt, um die Grenzwerte der Trinkwasserver-

ordnung für Calcitlösekapazität sowie für Sulfat sicher zu unterschreiten. Die Trinkwasserabgabe lag im Jahr 2020 bei rund 7,1 Mio. m<sup>3</sup>/a, wovon ca. 3,4 Mio. m<sup>3</sup>/a aus dem WW Stellingen stammen. Die Differenz wird aus dem Norden zugeführt. **Abbildung 1** zeigt das Fließschema des Werks.

Im anaeroben Betrieb wird die Versuchsanlage im Bypass zum Rohwasser-Hauptstrom direkt mit unbelüftetem Brunnenwasser des sulfathaltigen Brunnens beschickt. Beim aeroben Betrieb der Nanofiltration sowie der Kapillar-NF geschieht dies mit aufbereitetem Wasser (nach der Enteisung/Entmanganung). **Tabelle 1** gibt einen Einblick in die Qualität des Zulaufwassers zur Nanofiltration.

### Versuche zur Sulfatentfernung

Die Versuche zur Sulfatentfernung mittels Nanofiltration (anaerob, aerob) werden mit einer Pilotanlage der Firma

BREMAG (Umkehrosroseanlage Typ ROBA 4.4) und einem Durchsatz von ca. 1 m<sup>3</sup>/h durchgeführt (**Abb. 2**).

Jedes Druckrohr ist mit einem Spiralwickelmodul (NF270-4040) der Firma DOW-Filmtec bestückt. Diese Membran wurde auf Grundlage theoretischer Vorüberlegungen und einem Performance-Vergleich einer Reihe kommerziell verfügbarer NF-Membranen ausgewählt (höchster Sulfatrückhalt bei geringstem Betriebsdruck und höchstem Permeatflux). Es handelt sich um eine Polyamid-Membran (thin-film-composite); die aktive Membranoberfläche beträgt 7,6 m<sup>2</sup> pro Modul und somit insgesamt 30,4 m<sup>2</sup>.

Die modifizierten kapillaren Membranen wurden zunächst im Labormaßstab hergestellt und getestet. Hierfür kamen als Ausgangsmembranen Multibore Polyethersulfon-Membranen (DuPont Inge GmbH) mit sieben Kapillaren zum Einsatz, mit jeweils

einem Durchmesser von 0,9 mm, einer Gesamtlänge von 30 cm und resultierender aktiver Membranfläche von ca. 60 cm<sup>2</sup>.

Die Versuche zur kapillaren NF im Wasserwerk werden in einer zweistraßigen Versuchsanlage der Firma BREMAG durchgeführt (**Abb. 3**). Beide Straßen sind identisch aufgebaut und ermöglichen den simultanen Betrieb unterschiedlicher Membranmodifikationen. Die aktive Membranfläche (ca. 0,45 m<sup>2</sup>) ist deutlich kleiner als bei den kommerziellen NF-Versuchen und ergibt einen Durchsatz von ca. 15 l/h pro Straße. Zur Reinigung der Membran ist die Anlage mit einer hydraulischen Rückspülung, einer chemischen Rückspülung (CEB) und der Möglichkeit eines sogenannten „Cleaning in Place“ (CIP) ausgestattet.

Für die drei Verfahrensvarianten wird untersucht, wie das Trennverhalten und die Leistung der verwendeten

**Initial**<sup>®</sup>  
Die Hygiene-Experten

## Stark gegen Bakterien und Viren

jetzt  
**499,- €\***  
InspireAir 72



entfernt  
**Bakterien,  
Viren u. VOCs**



entfernt  
**99,95 %  
der Luftpartikel**



zeigt  
**Luftqualität  
in Echtzeit an**



jetzt  
**189,- €\***  
Desinfektions-  
säule



entfernt  
**99,9 % der  
Keime, Viren &  
Bakterien**



berührungslose  
**No Touch  
Technologie**



ergiebiger  
**Desinfektions-  
schaum**



Noch bis zum 31.03.2021 Einführungspreise zum Neustart von **Initial – Die Hygiene-Experten** sichern.\*

Jetzt bestellen unter der kostenlosen Hotline  
**0800 HYGIENE / 0800 49 44363**

[initial.com/de](http://initial.com/de)

\* Preis gültig vom 01.01.-31.03.2021. Preise ohne MwSt. Nicht kombinierbar mit anderen Rabatten und Aktionen. Nur solange der Vorrat reicht. Komplettpaket Desinfektionssäule zzgl. Versand. Bestellnummer: Art. Nr. 568949-1 (Säule), 568947 (Tropfschale), 568956 (Spender), 573215 (UltraProtect Schaum, 1.000 ml). Batterien nicht im Lieferumfang enthalten. InspireAir 72 zzgl. Versand von 6,95 € im gesamten Bundesgebiet Deutschland. Bestellnummer: Art. Nr. 573572.

Der Luftreiniger InspireAir 72 reinigt einen 36 m<sup>2</sup> großen Raum in nur 10 Minuten. Clean air delivery rate (CADR): 615.6m<sup>3</sup>/h; für Räume bis 72 m<sup>2</sup>. Verwenden Sie entsprechend mehrere Einheiten bei größeren Räumen.

Eine Marke von  
**Rentokil  
Initial**

Membranen durch die Betriebsbedingungen beeinflusst werden. Dabei wird der Einfluss von Ausbeute (Volumenstrom des Permeats/Volumenstrom des Rohwassers) und Flächenbelastung (Permeatflux [ $l/m^2h$ ]), die Effekte der Dosierung chemischer Zusätze (kommerzielle Antiscalants (AS)) zur Vermeidung von Scaling (Ausfallen von Salzen) sowie Wirksamkeit und Einflüsse chemischer Reinigungen ermittelt. Die Bewertung erfolgt auf Basis folgender Parameter:

- Transmembrandruck (TMP, Einheit: bar): Druckdifferenz zwischen Feed- und Permeatseite und damit treibende Kraft des Transports durch die Membran
- Druckdifferenz ( $\Delta p$ , Einheit: bar): Druckverlust längs der Membran zwischen Feed und Konzentrat
- temperatur- und druckkorrigierter Permeatfluss (Einheit:  $l/h$ )
- normierter Salzurückhalt: Verhältnis Salzkonzentration im Feed zur Konzentration im Permeat (Einheit: Prozent)

Auch wenn kein Fouling/Scaling auftritt, verändern variable Umgebungsbedingungen (wie z. B. die Temperatur) die Bewertungsparameter. Aus diesem Grund werden diese Parameter (auf eine Referenztemperatur und die Startbedingungen als 24-Stunden-Mittelwert des jeweiligen Parameters) normiert bzw. korrigiert. Auf diese Weise lassen sich Veränderungen der Umgebung herausrechnen und die Leistung der Membran bestmöglich bewerten und vergleichen.

Während einer Versuchsphase werden die Betriebseinstellungen konstant gehalten. Die Dauer je Versuchsphase beträgt mindestens fünf Wochen, sofern festgelegte Grenzen der Bewertungsparameter nicht überschritten werden. Zum Ende einer Versuchsphase oder bei Überschreiten bestimmter Kriterien (10 bis 15 Prozent Performanceabnahme) wird eine chemische Reinigung mit Phosphorsäure und/oder Natronlauge durchgeführt.

Im anaeroben Betrieb wird unbelüftetes Brunnenwasser direkt über die

Membran geleitet. Ein Sauerstoffeintrag muss bei dieser Betriebsweise zu jeder Zeit vermieden werden: So wird z. B. nach der chemischen Reinigung (CIP) eine Spülung mit Natriumbisulfit durchgeführt, um bei der CIP eingetragenen Sauerstoff aus der Anlage zu entfernen.

In den **Tabellen 2** und **3** sind die durchgeführten Versuchsphasen (VP) gelistet. Die Dosierung des Antiscalants ist jeweils bezogen auf das kommerzielle Flüssigprodukt angegeben, nicht als Wirkstoff.

## Ergebnisse

### Anaerobe Nanofiltration

Beim anaeroben Betrieb der Nanofiltration wird Sulfat während der Versuche immer zu mehr als 98 Prozent zurückgehalten. Ein stabiler Versuchsbetrieb ist durch eine geringe Veränderung des normierten Transmembrandrucks TMP,  $\Delta p$  und der Permeabilität gekennzeichnet. Ein Anstieg des TMP oder Abfall der Permeabilität deutet auf eine Belegung der Membran (Fouling oder Scaling) hin, wohingegen eine Zunahme des  $\Delta p$  auf Ablagerungen in den Feedkanälen der Membranwickelmodule hinweist.

Einen stabilen Betrieb liefert VP I (Ausbeute 75 Prozent, mit Antiscalant-Dosierung auf Phosphonatbasis, Flux  $20 l/m^2h$ ) und annähernd VP II. Die Abnahme der Membranperformance während der Versuchsphasen kann auf organisches Fouling in Kombination mit zweiwertigen Kationen und Huminstoffen sowie auf Scaling durch im Wasser vorhandene Aluminosilikate zurückgeführt werden. Eine höhere Ausbeute (80 Prozent), sowie ein höherer Flux ( $23 l/m^2h$ ) und eine damit einhergehende höhere Membranbelastung verstärken das Fouling und beschleunigen die Leistungsabnahme (**Abb. 4**).

Bei Verzicht auf Antiscalants können (durch Analyse der Reinigungslösungen) einerseits Calciumsulfatscaling, andererseits Eisenausfällungen nach-

**Tabelle 2: Untersuchungsprogramm NF anaerob, CIP nach jeder Versuchsphase, ausgewählte Versuchsphasen**

Versuchsphase	Dauer	Ausbeute	Flux	Permeat	Rezirkulation	Antiscalant-Dosierung und -Art
	Wochen		$l/m^2h$	$l/h$	$l/h$	$mg/l$
I	9	75 %	20	600	600	3 (Phosphonate)
II	6	80 %	20	600	650	3 (Phosphonate)
IV	5	75 %	20	600	600	0
VI	6	75 %	20	600	600	3,8 (Polyacrylate)
VIII	2	75 %	23	700	700	3 (Polyacrylate)

Quelle: HAMBURG WASSER

**Tabelle 3: Untersuchungsprogramm NF aerob, CIP nach Versuchsphase III und Versuchsphase VI**

Versuchsphase	Dauer	Ausbeute	Flux	Permeat	Rezirkulation	Antiscalant-Dosierung und -Art
	Wochen		$l/m^2h$	$l/h$	$l/h$	$mg/l$
I	5	75 %	20	600	600	1,6 (Phosphonate)
II	5	80 %	20	600	650	1,8 (Phosphonate)
III	5	80 %	20	600	650	0
IV	5	75 %	20	600	600	0
V	5	80 %	20	600	650	1,8 (Polyacrylate)
VI	2	80 %	24,7	750	810	1,8 (Polyacrylate)

Quelle: HAMBURG WASSER

gewiesen werden. Eine Antiscalant-Zugabe erweist sich also als notwendig. Das kommerzielle Antiscalant auf Phosphonatbasis (AS 1) erzielt bessere Ergebnisse als das auf Polyacrylatbasis (AS 2). Es wird vermutet, dass das polyacrylatbasierte Antiscalant AS 2 das Biofouling-Potenzial fördert.

Die mit Natronlauge und Phosphorsäure durchgeführten chemischen Reinigungen erweisen sich bei überwiegend organischem Fouling als wirksam, wobei eine zweistufige Reinigung die besten Ergebnisse erzielt. Es wird aber eine geringfügige Verschlechterung der Permeatqualität in Zusammenhang mit den durchgeführten Reinigungen im anaeroben Betrieb beobachtet.

#### Aerobe Nanofiltration

Beim aeroben Betrieb der Nanofiltration wird Sulfat während der Versuche ebenfalls immer zu mehr als 98 Prozent zurückgehalten. Ein stabiler Versuchsbetrieb ist unter Zugabe von Antiscalant bis mindestens 80 Prozent Ausbeute zu beobachten. Die Versuchsphase IV (Ausbeute 75 Prozent, keine Antiscalant-Dosierung) liefert vielversprechende Ergebnisse hinsichtlich eines Verzichts der Antiscalant-Zugabe im großtechnischen Betrieb. Die Abnahme der Membranperformance während der Versuchsphasen III und IV (keine AS-Zugabe) kann auf Scaling zurückgeführt werden. Ausfällungen der aufkonzentrierten Wasserinhaltsstoffe werden in diesen Versuchsphasen nicht durch Antiscalants verhindert und führen somit zu einem TMP-Anstieg und in Versuchsphase III (Ausbeute 80 Prozent, keine AS-Dosierung) zu einer deutlichen Abnahme des Permeatflusses.

Die Anwendung von Antiscalants verursacht, wie im anaeroben Betrieb, einen Anstieg des  $\Delta p$  (bei konstantem Permeatfluss), während beim TMP nur geringe Änderungen beobachtet wurden. Es wird vermutet, dass das AS Ausfällungen verzögert, diese u. a. durch die Rezirkulation bedingt im Feedkanal und nicht

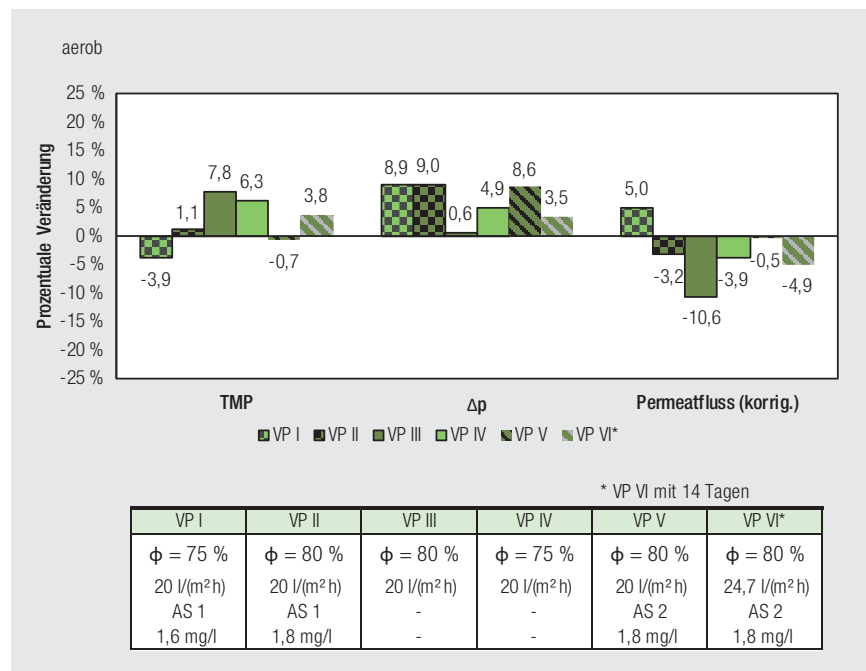


Abb. 4: Versuchsergebnisse der aeroben NF, AS – Antiscalant

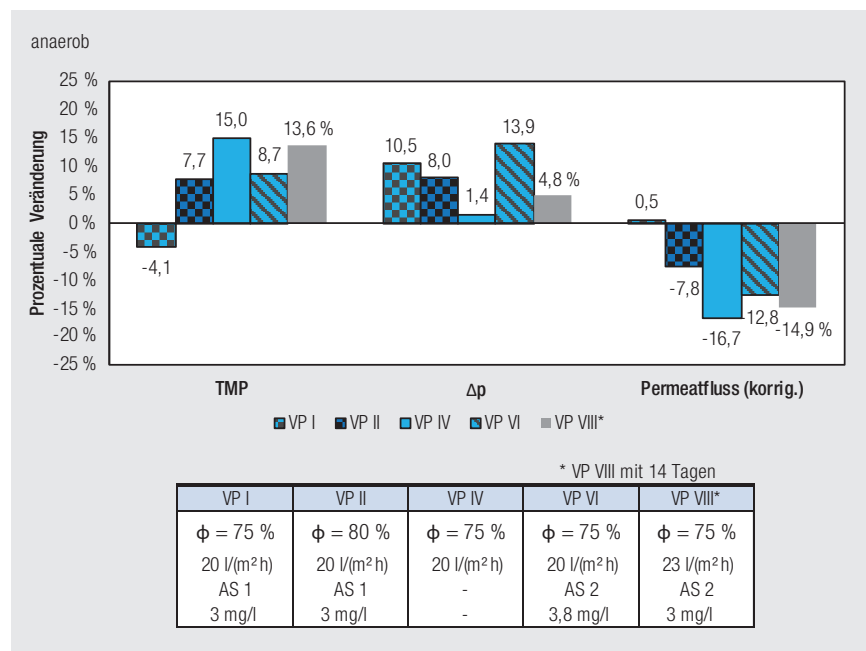


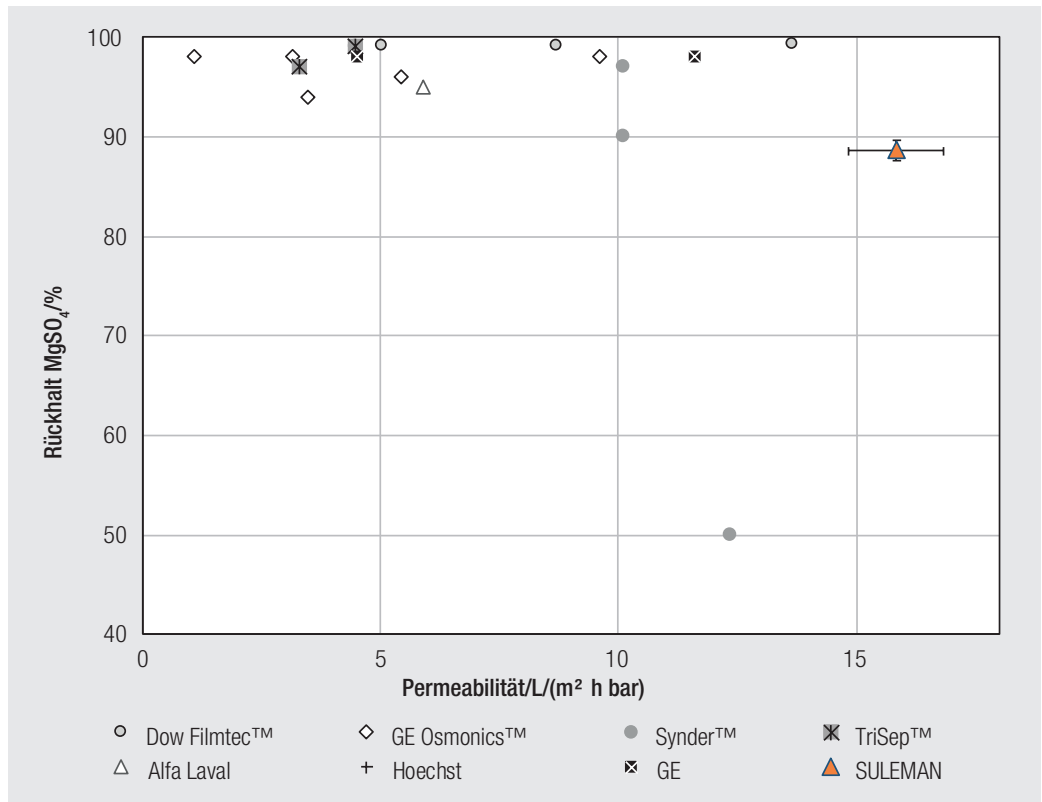
Abb. 5: Versuchsergebnisse der anaeroben NF, ausgewählte Versuchsphasen (VP), AS – Antiscalant

an der Membran stattfinden und so die Membranperformance nicht negativ beeinflussen. Das polyacrylatbasierte Antiscalant (AS 2) liefert – im Gegensatz zu den Erfahrungen im anaeroben Betrieb – gleichwertige Ergebnisse wie das phosphonatbasierte Antiscalant (AS 1) und sorgt für einen stabilen Versuchsbetrieb bei 80 Prozent Ausbeute (Versuchsphase V) (Abb. 5).

#### Aerobe kapillare Nanofiltration

Die kapillaren NF-Membranen konnten im Labormaßstab (Membranfläche ca. 60 cm<sup>2</sup>) erfolgreich modifiziert werden. Es wurden Rückhalte um 90 Prozent für Magnesiumsulfat erreicht, bei Reinwasserpermeabilitäten von ca. 15 l/(m<sup>2</sup> h bar) (Abb. 6). Unter vergleichbaren Betriebsbedingungen liegt die neue Membran damit zwar bei etwas geringeren Rück-

**Abb. 6:** Vergleich der im SULEMAN-Projekt modifizierten Membranen im Labormaßstab (oranges Dreieck) mit kommerziell verfügbaren Nanofiltrationsmembranen (Daten berechnet aus Datenblättern der Hersteller); Testbedingungen: Kapillar-NF: Feedlösung: 2.000 mg/l  $MgSO_4$ , Temperatur: 25 °C, Flux: 30 l/(m<sup>2</sup> h bar), Überströmgeschwindigkeit: 5 m/s, Ausbeute: 15 Prozent, n = 2



Quelle: DVGW-Forschungsstelle TUHH

halten für Magnesiumsulfat als kommerzielle NF-Membranen, die Permeabilität bewegt sich dafür jedoch im höheren Bereich.

Der Modifikationsprozess konnte zudem auf größere Module (Membranfläche von ca. 0,45 m<sup>2</sup>) übertragen werden, sodass auch hier ein Rückhalt von ca. 90 Prozent erreicht wurde. Die Stabilität der Membranen gegenüber hydraulischem Rückspülen wurde zunächst in Technikumsversuchen über 50 Rückspülzyklen getestet. Dabei konnte ein stabiler Betrieb mit gleichbleibenden Trenneigenschaften bis zu einem Rückspülfluss von mindestens 50 l/(m<sup>2</sup> h) festgestellt werden – diese Möglichkeit der mechanischen Reinigung würde einen deutlichen Vorteil gegenüber der kommerziellen NF bedeuten.

Erste Ergebnisse aus dem Betrieb im Wasserwerk zeigen, dass die neue Membran auch mit dem realen Wasser einen Rückhalt für Sulfat von ca. 80 bis 90 Prozent erreicht. Die Langzeitperformance der Membran im Vor-Ort-Versuch ist Teil fortlaufender Untersuchungen.

### Diskussion

Sulfat wird in beiden kommerziellen NF-Verfahrensoptionen (anaerob/aerob) zu mindestens 98 Prozent entfernt, sodass sich das Ver-

fahren sowohl zentral als auch dezentral erfolgreich zur Einhaltung des Sulfat-Grenzwertes anwenden lässt. Eine dezentrale Aufstellung bietet dabei den Vorteil, dass für die Aufbereitung von Wasser an der Stelle der höchsten Belastung eine kleinere Anlage (Zulauf etwa 1/3 im Vergleich zu zentraler NF) ausreichend ist, um den Zielsulfatwert im Reinwasser zu erreichen. Ein sicher zu verhindernder Sauerstoffeintrag im anaeroben Betrieb stellt einen Risikofaktor für die Prozessstabilität dar, zudem ist der Zusatz von Antiscalants erforderlich. Dezentral besteht keine Flexibilität bei der Aufbereitung von Wasser neuer, teilversalzener Brunnen, bei Pumpenausfall oder einem Rückgang der Brunneneignigkeit. Bei einer aeroben NF hingegen ist diese Flexibilität gegeben und auf Antiscalants kann voraussichtlich verzichtet werden. Ein Nachteil ist hier, dass eine größere Anlage zur Aufbereitung des Mischwasserteilstroms benötigt wird, um Sulfat angemessen zu reduzieren.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass in beiden Varianten etwa 20 bis 25 Prozent des zu behandelnden Wassers als Konzentrat anfallen, welches entsorgt werden muss. Ein Verzicht auf Antiscalants ist hierbei von Vorteil. Optionen zur Entsorgung werden noch untersucht. Hinsichtlich Flexibilität, Prozessstabilität und Entsorgungsmöglichkeiten

(kein Antiscalant-Einsatz und geringere Belastung des Konzentrats) wird aus diesen Gründen aktuell eine zentrale Sulfatentfernung favorisiert.

Die kapillare NF-Membran konnte erfolgreich im Labor- und Technikumsmaßstab modifiziert werden. Die Performance der Membran über einen längeren Zeitraum wird in laufenden Vor-Ort-Versuchen untersucht. Dabei werden die Betriebsparameter (Überströmgeschwindigkeit, Ausbeute, Flux etc.) variiert, um den Einfluss auf die Prozessstabilität und das Filtrationsergebnis zu identifizieren. Weiterhin soll die hydraulische Rückspülung als möglicher Vorteil der kapillaren NF gegenüber der kommerziellen NF im Langzeitbetrieb untersucht werden.

## Ausblick

Während die Vor-Ort-Versuche im WW Stellingen mit den kommerziellen NF-Membranen abgeschlossen sind, werden die Versuche mit den neuen kapillaren NF-Membranen weitergeführt, um insbesondere die Stabilität der Membranen und die Reinigungsmöglichkeiten zu testen. Die Ergebnisse mit den verschiedenen Nanofiltrationsverfahren sollen dann im Rahmen des Projektes SULEMAN miteinander verglichen und durch den Projektpartner KompetenzZentrum Wasser Berlin mithilfe eines Life Cycle Assessment bewertet werden. Dabei gehen auch die Projektergebnisse zur Nanofiltration so-

wie zum Ionenaustauschverfahren Carix an einem Wasserwerksstandort der Berliner Wasserbetriebe mit anderer Wasserzusammensetzung ein. Zum Abschluss des Projektes erfolgt dann ein umfassender Vergleich der Verfahren zur Sulfatentfernung in Bezug auf ihre Eignung für verschiedene Grundwässer, Energieeffizienz und Kosten.

## Danksagung

Die Projektpartner des Verbundprojektes SULEMAN (Förderkennzeichen 03ET1574) bedanken sich für die finanzielle Förderung durch das Bundeswirtschaftsministerium (BMWi). Die DVGW-Forschungsstelle TUHH dankt darüber hinaus dem DVGW für die Ko-Finanzierung ihres Teilprojektes (Förder-Nr.: W 201806) sowie den Projektpartnern Surflay Nanotec GmbH und DuPont Inge GmbH für die gute Zusammenarbeit im Bereich LbL-Beschichtung. ■

## Literatur

- [1] Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE): Wasserbedarfsprognose 2050 für das Versorgungsgebiet von HAMBURG WASSER, Aktualisierung der Wasserbedarfsprognose 2045 für das Versorgungsgebiet der Hamburger Wasserwerke GmbH (HWW) in der Metropolregion Hamburg. Unveröffentlichter Endbericht, Frankfurt am Main/München 2019.
- [2] Müller, U., Baldauf, G., Osmera, S., Götttsche, R.: Erfassung und Bewertung von Nanofiltrations- und Niederdruckumkehrosenanlagen in der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland. TZW-Schriftenreihe, Band 39, Karlsruhe 2009.
- [3] DVGW-Information WASSER Nr. 72: Nanofiltration und Umkehrosen, Bonn 2009.
- [4] Joseph, N., Ahmadiannamini, P., Hoogenboom, R., Vankelecom, I. F. J.: Layer-by-layer preparation of polyelectrolyte multilayer membranes for separation, in: Polym. Chem. 5/2014, S. 1817–1831.

- [5] Stumme, J., Ashokkumar, O., Dillmann, S., Niestroj-Pahl, R., Ernst, M.: Theoretical Evaluation of Polyelectrolyte Layering during Layer-by-Layer Coating of Ultrafiltration Hollow Fiber Membranes, in: Membranes 2021, 11, 106.

## Die Autoren

**Dorothea Mergel** ist Mitarbeiterin des Bereichs Werke von HAMBURG WASSER und ist Ansprechperson für die Versuche zur Nanofiltration.

**Jakob Stumme** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der DVGW-Forschungsstelle TUHH und Ansprechperson für die Membranbeschichtung mittels LbL-Technik.

**Elena Jacki** und **Lynn Massaki Claasen** betreuen als Masterandinnen die Versuche zur (an-)aeroben Nanofiltration.

**Sebastian Ernst** ist Betriebsingenieur der Werksgruppe West bei HAMBURG WASSER und ist Projektleiter im BMWi-Projekt SULEMAN.

**Dr.-Ing. Barbara Wendler** ist Gruppenleiterin Verfahrenstechnik an der DVGW-Forschungsstelle TUHH und Projektkoordinatorin des BMWi-Projektes SULEMAN.

## Kontakt:

Dr.-Ing. Barbara Wendler  
DVGW-Forschungsstelle TUHH  
Technische Universität Hamburg  
Am Schwarzenberg-Campus 3  
21073 Hamburg  
Tel.: 040 42878-3918  
E-Mail: barbara.wendler@tuhh.de  
Internet: www.tuhh.de/www/dvgw-tuhh



Die **SHT, Sanitär- und Heizungstechnik Ausgabe 2**, enthält Beiträge zu den Themen Sanitär-, Heizungs- sowie Klima- und Lüftungstechnik und stellt Referenzobjekte sowie neue Produkte und Normen aus diesen Bereichen vor. Lesen Sie darüber hinaus mehr zu den Themen:

- **Regenwasser**  
Rückstausicherung mit Unterflurhebeanlagen
- **Sanierungen**  
Heizung: GEG-Quote ist einfach zu wenig
- **Lüftung**  
Ursachen von Leckagen bei Luftleitungssystemen

Weitere Nachrichten, Termine und Informationen unter [www.sht-online.de](http://www.sht-online.de).  
Kostenloses Probeheft unter [vertrieb@krammerag.de](mailto:vertrieb@krammerag.de).