

PFAS-Entfernung mittels Hohlfaser-Nanofiltrationsmembranen

Zur Einhaltung der künftig geltenden Grenzwerte für die Summenparameter PFAS-20 und PFAS-4 wurde der **Einsatz von Hohlfaser-Nanofiltrationsmembranen (NF) als mögliches Aufbereitungsverfahren untersucht**. In Pilotversuchen mit einem kommerziellen NF-Modul erfolgte die Erprobung an vier Standorten unter wasserwerks-spezifischen Betriebsbedingungen. In allen Versuchsläufen konnten die geforderten Zielkonzentrationen für PFAS-20 und PFAS-4 sicher eingehalten werden. Für die im Projekt untersuchten Wasserbeschaffenheiten zeigte sich der **Einsatz der Hohlfaser-Nanofiltrationsmembran als geeignetes Verfahren zur PFAS-Entfernung**.

von: Patricia Riede, Dr. Pia Lipp (beide: TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser) & Tim Sewerin (NX Filtration)

Tabelle 1: Eigenschaften der eingesetzten Membranen

Membrantyp	Hohlfasermembran	
	dNF80	dNF40
Mindestrückhalt: ¹		
MgSO ₄	> 76 %	> 91 %
MWCO	800 g/mol	400 g/mol
pH-Bereich	2-12	2-12

¹ 5 mmol/L MgSO₄, 3 bar, 25 °C, v = 0,5 m/s; Angaben Produktdatenblätter

Tabelle 2: Charakteristische Parameter der Rohwasserbeschaffenheiten (Zulauf Pilotanlage) bei den Modellstandorten

Parameter	Einheit	Standort 1	Standort 2	Standort 3	Standort 4
PFAS-20	µg/L	0,07-0,15	0,07-0,14	0-0,01	0,06-0,11
PFAS-4	µg/L	0,02-0,05	0,03-0,06	0-0,01	0,04-0,07
TOC	mg/L	0,6-1,3	1,3-1,7	1,2-1,4	3,1-4,0
pH-Wert	-	7,4-7,8	7,1-7,3	7,3-7,6	7,1-7,9
Leitfähigkeit 25 °C	µS/cm	580-640	660-680	500-520	770-925
Gesamthärte	°dH	13,4-15,9	18,3-19,4	13,5-15,2	17,8-18,5

Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) stellen aufgrund ihrer biochemischen Stabilität und vielseitigen Anwendungsspektren eine erhebliche umwelttechnische Herausforderung dar. Sie sind ubiquitär in der Umwelt vorhanden, können sich in vielen Kompartimenten anreichern und auch ins Grundwasser gelangen [1]. Dies hat zu strengeren regulatorischen Vorgaben wie den in der Trinkwasserverordnung festgelegten Grenzwerten für die Summe von 20 (Summe PFAS-20, gültig ab 12. Januar 2026) bzw. 4 PFAS-Substanzen (Summe PFAS-4, gültig ab 12. Januar 2028) geführt [2]. Die Wasserversorgung steht vor diesem Hintergrund vor der Aufgabe, PFAS aus dem Rohwasser zu entfernen und die gesetzlichen Anforderungen im Trinkwasser zu erfüllen [3]. Bestehende Verfahren wie die Aktivkohlefiltration, Umkehrosmose oder Ionenaustausch können zwar zur



PFAS-Entfernung eingesetzt werden. Sie weisen jedoch Einschränkungen auf, etwa geringe Rückhalte kurzketziger PFAS, erforderliche Nachbehandlung, einen hohen Energiebedarf oder fehlende Zulassungen zur Anwendung in der Trinkwasseraufbereitung.

Die Hohlfaser-Nanofiltration stellt als modifizierte Ultrafiltration mit Nanofiltrationseigenschaften ein vielversprechendes Verfahren zur PFAS-Entfernung dar. Sie ermöglicht einen höheren Rückhalt für zweiwertige Ionen und höhermolekulare organische Substanzen und entfernt partikuläre Wasserinhaltsstoffe. Infolge der geringeren Aufkonzentrierung kann ggf. auf die Zugabe von Antiscalants verzichtet und die Problematik der Konzentratentsorgung entschärft werden.

Im Rahmen des vom DVGW geförderten F&E-Vorhabens „Kapillo-PFAS“ (Förderkennzeichen: W202304, Laufzeit: Juli 2023 bis September 2025) wurden die verfahrenstechnischen Möglichkeiten und Grenzen unter wasserwerksspezifischen Bedingungen untersucht [4]. Eine Pilotanlage mit einem kommerziellen NF-Modul wurde an insgesamt vier Wasserwerksstandorten mit unterschiedlichen Wasserbeschaffenheiten für einen Zeitraum von rund drei Monaten betrieben und die erreichbaren Betriebsbedingungen sowie PFAS-Rückhalte ermittelt.

Material und Methoden

Membranen

Im Rahmen der Pilotversuche wurden zwei Hohlfasermembranen getestet, darunter ein offenerer und ein dichter Membrantyp. Neben der Molekülgröße und -form ist der Membranrückhalt aufgrund der geladenen Membranbeschichtung auch abhängig von der Ladung [5]. Wesentliche Membraneigenschaften sind in **Tabelle 1** dargestellt.

Wasserbeschaffenheit

Bei allen Wässern der Modellstandorte handelt es sich um Grundwässer, welche sich in ihrer PFAS-Konzentration, Mineralisierung und der Konzentration organischer Wasserinhaltsstoffe unterscheiden (**Tab. 2**).

Pilotanlage

Die Pilotierungen an den Modellstandorten erfolgten mit einer Versuchsanlage mit einem großtechnischen NF-Modul (Membranfläche: 50 m²). Die Anlage ist in einem 20-Fuß-Container untergebracht (**Abb. 1**) und per Fernsteuerung bedienbar, sodass Prozessparameter unmittelbar verändert werden können. Die Anlage wird im Feed-and-Bleed-Modus betrieben und im IN/OUT- ▶

Abb. 1: Innen- und Außenansicht der Pilotanlage am Wasserwerksstandort

➔ www.dvgw-kongress.de/entwicklungen-im-wasserrecht

Aktuelle Entwicklungen im Wasserrecht

Online-Veranstaltungsreihe 2026

Gebuchte
Veranstaltungen auch
on demand verfügbar

Veranstaltungen

- ➔ **Düngeverordnung, NVZ & Nitrat**
29. April 2026, online
- ➔ **PFAS-Qualitätsanforderungen für Gewässer**
6. Mai 2026, online
- ➔ **TrinkwV / TrinkwEGV**
16. September 2026, online
- ➔ **Novelle des Wasserhaushaltgesetzes –
Rahmenbedingungen für eine
Wasserwiederverwendung**
23. September 2026, online

Betrieb mit Rohwasser beaufschlagt, wobei ein Feedvolumenstrom bis 2 m³/h möglich ist. Es handelte sich um voraufbereitete Rohwässer bzw. Trinkwässer der Wasserwerksstandorte. Das resultierende Permeat wird im Permeattank aufgefangen, welcher auch als Vorlage für Spülungen und Reinigungen dient. Die Pilotanlage enthält Dosiereinrichtungen für Säure, Lauge und Chlorbleichlauge sowie Antiscalant. Während der Pilotierungen wurden lediglich chemisch unterstützte Spülungen mit Säure und Lauge durchgeführt.

Betriebsbedingungen und Pilotierungen

Je Standort erfolgte ein etwa dreimonatiger Pilotbetrieb mit dem Membrantyp dNF40; am Standort 4 wurde zeitweise zusätzlich der offenere Membrantyp dNF80 eingesetzt. Nach jedem Filtrationszyklus fand eine hydraulische Reinigung der Membran, bestehend aus einem Forward Flush (Überströmung der Membran mit Rohwasser) und einem Backwash (Rückspülung mit Permeat) statt.

Während des Betriebs der Pilotanlage an den vier Standorten wurden wöchentlich Proben der drei Teilströme Feed, Permeat und Konzentrat entnommen und auf Parameter einer physikalisch-chemischen Vollanalyse, Scaling- und Foulingbildner sowie PFAS analysiert.

An der Versuchsanlage wurden die Einflussgrößen Ausbeute, Flux, Cross-Flow, Filtrationsdauer und Reinigungsintervalle systematisch untersucht und

je Modellstandort optimiert. Es wurden möglichst hohe Ausbeuten (80–85 Prozent) und Flächenbelastungen (20–25 L/(m² h)), lange Filtrationsintervalle (60–360 min) sowie seltene Reinigungen angestrebt. Weiterhin wurde der Cross-Flow (0,1–0,4 m/s) verringert, um den Energiebedarf durch die Rezirkulation zu reduzieren. Eine hohe tangentielle Überströmung der Membran dient der Minimierung von Fouling und Scaling infolge von Auswirkungen der Konzentrationspolarisation, erhöht jedoch gleichzeitig den Energiebedarf.

Ergebnisse

Anlagenbetrieb

Die Betriebsparameter wie Ausbeute, Flächenbelastung und Filtrationsdauer wurden während der Versuche stufenweise gesteigert und die Überströmungsgeschwindigkeit sowie die Häufigkeit chemisch-unterstützter Spülungen verringert (Tab. 3). Es wurde ein stabiler Anlagenbetrieb mit großtechnisch üblichen Operationseinstellungen ohne Abnahme der Permeabilität verzeichnet.

Am ersten Modellstandort trat vermutlich Calciumcarbonatscaling auf, was sich negativ auf den Membranrückhalt auswirkte. Auch an Standort 4 wurde Calciumcarbonatscaling vermutet, weshalb beim Betrieb der dNF40 eine Säuredosierung im Zulauf installiert wurde. Das Scaling an diesen beiden Standorten ist vermutlich durch die unterschiedliche Wasserbeschaffenheit mit teils höheren Wasserhärten und pH-Werten sowie den Konzentrationsanteilen von Hydrogencarbonat, Sulfat

und Chlorid bedingt. Der Einfluss der Wassermatrix auf den Salzzückhalt wird derzeit weiter untersucht. Es wurde jedoch bei keinem der Versuchsläufe ein Antiscalant dosiert.

In Bezug auf Mineralien weist die Membran das höchste Rückhaltevermögen für Sulfat auf, welches an allen Standorten über 80 Prozent betrug. Die Gesamthärte wurde zwischen 15 und 40 Prozent reduziert. Vereinzelt wurde der Donnan-Effekt (Elektroneutralität auf beiden Seiten der Membran) beobachtet, insbesondere an Standort 4. Hier zeigten sich für Chlorid und Nitrat negative Rückhalte.

Die Hohlfaser-Membrananlage wird im Cross-Flow betrieben, um eine Überströmung entlang der Membran herzustellen und damit die Dicke der Konzentrationspolarisationsschicht zu verringern. Das Aufrechterhalten des Rezirkulationsstroms hat einen großen Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf der Anlage. Während der Pilotierungen wurden verschiedene Überströmungsgeschwindigkeiten getestet. Im Ergebnis zeigte sich, dass eine Verringerung der Überströmungsgeschwindigkeit um 0,2 m/s eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfs um 15 Prozent bewirkte. Die Hohlfaser-Membranmodule können auch in der sogenannten Tannenbaumschaltung angeordnet werden, wie es für konventionelle Spiralwickelmodule der Fall ist. Mehrstufige Systeme haben einen positiven Einfluss auf die resultierende Permeatbeschaffenheit und den Energiebedarf. Im Mittel kann beim Betrieb der Hohlfaser-Membrananlage von einem spezifischen Energiebedarf von 0,25–0,35 kWh/m³ Permeat ausgegangen werden, mit niedrigeren spezifischen Energiebedarfen für die Tannenbaumschaltung (Beispielrechnung Standort 3: 0,22 kWh/m³ Permeat). Dieser ist damit etwas höher als beim Betrieb von NF-Anlagen mit Spiralwickелеlementen in Tannenbaumschaltung (ca. 0,20 kWh/m³ Permeat). Ein direkter Vergleich des spezifischen Energiebedarfs von Hohlfaser- und Spiralwickel-Nanofiltration ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da sich

Tabelle 3: Betriebseinstellungen während der Pilotierungen an den vier Wasserwerksstandorten

Modellstandort		1	2	3	4
Membrantyp		dNF40	dNF40	dNF40	dNF80, dNF40
Ausbeute	%	75–80	80–85	80–90	75–85
Flux	L/(m ² h)	15–20	20–25	20–28	20
Cross-Flow	m/s	0,3	0,1–0,3	0,1–0,2	0,3–0,4
Filtrationszeit	min	60	60–240	60–1.440	60
chem.- unterstützte Spülungen		keine bis alle 2d	1–7 × pro Woche	1–7 × pro Woche	täglich

Quelle: TZW

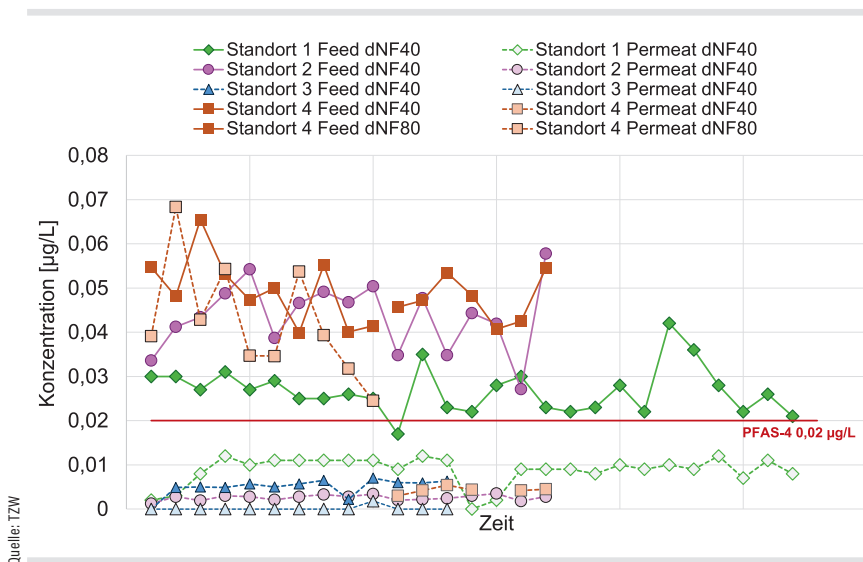


Abb. 2: Summe der PFAS-4-Konzentrationen in den Teilströmen Feed und Permeat an den Standorten 1 bis 4

beide Systeme in Rückhalteverhalten, Voraufbereitungsbedarf und Zielwasserqualität unterscheiden. Der Energiebedarf muss stets im Kontext der eingesetzten Verfahrenskombination und Rohwasserbeschaffenheit bewertet werden. Die Variation des Cross-Flows hatte im Pilotbetrieb keine wesentlichen Auswirkungen auf die anderen Betriebsparameter wie Flux, Transmembrandruck, Ausbeute und Permeabilität. Auch die Leitfähigkeiten im Permeat oder Konzentrat waren davon unbeeinflusst.

Bei der Membranfiltration fällt ein Konzentrat an, welches die PFAS ent-

sprechend der Anlagenausbeute in aufkonzentrierter Menge enthält und üblicherweise in ein nahegelegenes Fließgewässer abgeleitet wird. Dieses Vorgehen wird von den Umweltbehörden zunehmend kritisch bewertet, einhergehend mit der Forderung nach einer zusätzlichen Aufbereitung des Konzentrats. Um die Technologie der Membranfiltration auch weiterhin nutzen zu können, ist es für die Trinkwasserversorgung daher essenziell, dass Aufbereitungsverfahren für Konzentrate zur Verfügung stehen. Die Schaumfraktionierung und die Behandlung mit PFAS-bindenden Fällungsmitteln erscheinen zur Entfernung von PFAS aus Memb-

rankonzentraten vielversprechend. Für die Bewertung der Grenzen und Möglichkeiten solcher Verfahren sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

PFAS-Rückhalt

Das Ziel der PFAS-Entfernung wurde mit der Hohlfasermembran dNF40 stets erreicht. Im Permeat wurden an allen Standorten die künftig geltenden Grenzwerte der PFAS-Summen eingehalten. Nur mit der offeneren dNF80-Membran, welche am Standort 4 eingesetzt wurde, wurde der zukünftig geltende Grenzwert für die Summe PFAS-4 von 0,02 µg/L überschritten. In **Abbildung 2** sind die Konzentrationen der PFAS-4 im Zu- und Ablauf der Membran je Standort dargestellt. Die Einhaltung des Grenzwertes für die Summe PFAS-20 war an allen Standorten gegeben und unkritischer als für die Summe PFAS-4.

Am Standort 1, wo der Membranrückhalt vermutlich durch Calciumcarbonatscaling beeinträchtigt war, war das PFAS-Rückhaltevermögen insgesamt mit rund 60 Prozent vergleichsweise gering. Mit den intakten dNF40-Membranen an den Standorten 2 bis 4 wurde ein durchschnittliches Rückhaltevermögen von 80 bis 95 Prozent (Summen PFAS-4 und PFAS-20) erreicht. **Abbildung 3** zeigt den Rückhalt der einzelnen PFAS-Substanzen an ▶

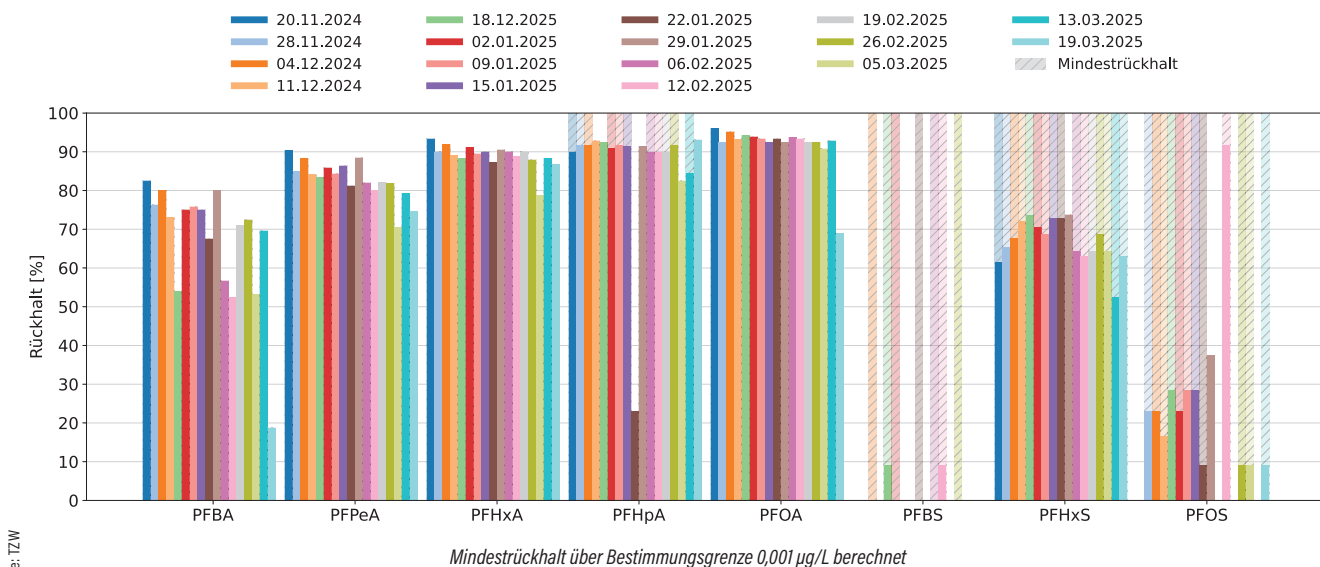


Abb. 3: PFAS-Rückhalt am Standort 2



Das Ziel der Verminderung der Summenkonzentrationen PFAS-20 und PFAS-4, für welche zukünftig Trinkwassergrenzwerte gelten, wurde mit dem Membrantyp dNF40 in jedem Versuchslauf und den getesteten Einstellungen erfüllt.

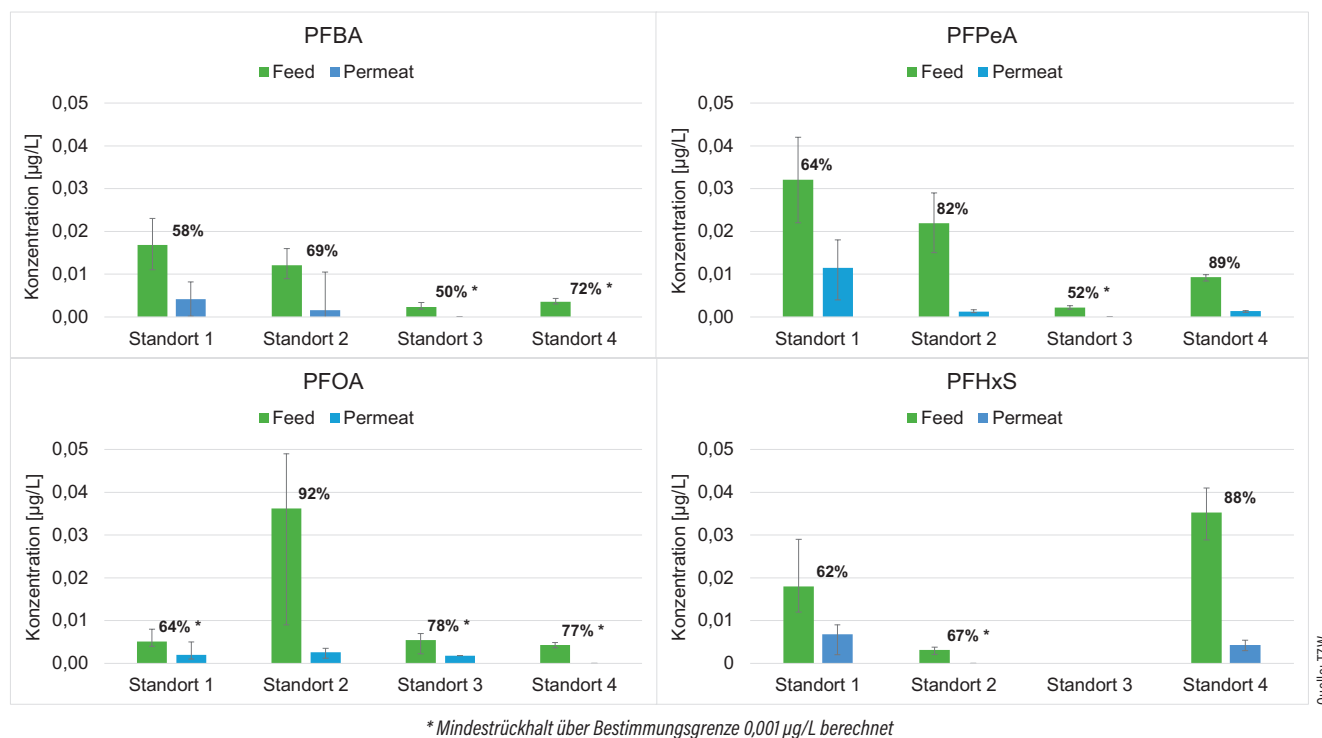


Abb. 4: Mittlere Zu- und Ablaufkonzentration sowie Rückhalt in Prozent an den Standorten 1–4 für die Substanzen PFBA, PFPeA, PFHxS und PFOA

Standort 2. Im Mittel betrug der Rückhalt für die Summe PFAS-20 90 Prozent und für die Summe PFAS-4 knapp 95 Prozent.

In **Abbildung 4** sind exemplarisch die Zu- und Ablaufkonzentrationen sowie mittleren Rückhalte für die Einzelsubstanzen PFBA, PFPeA, PFHxS und PFOA dargestellt. Aufgrund der geringen Konzentrationen im Permeat kann oft nur der Mindestrückhalt (berechnet über die Bestimmungsgrenze 0,001 µg/L) ermittelt werden. Beim Vergleich des Rückhaltevermögens sind die unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen zu berücksichtigen.

Zusammenfassung

Im Rahmen von mehrmonatigen Pilotversuchen an vier Wasserwerksstandorten wurde die Eignung der Hohlfasernanofiltrationsmembran zur PFAS-Entfernung untersucht.

Das Ziel der Verminderung der Summenkonzentrationen PFAS-20 und PFAS-4, für welche zukünftig Trinkwassergrenzwerte gelten, wurde mit dem Membrantyp dNF40 in jedem Versuchslauf und den getesteten Einstellungen er-

füllt. Für den Anlagenbetrieb stellt bei mineralisierten Wässern das Auftreten von Calciumcarbonatscaling eine Herausforderung dar und führte an einem Standort zu Membranscaling und damit vermindertem Rückhaltevermögen für Salze und PFAS. Diesem kann mittels Säuredosierung im Zulauf entgegengewirkt werden.

Die Betriebsparameter wie Ausbeute, Flächenbelastung und Filtrationsdauer wurden während der Versuche stufenweise gesteigert und Überströmungsgeschwindigkeit und die Häufigkeit chemisch-unterstützter Spülungen verringert. Es wurde ein stabiler Anlagenbetrieb mit großtechnisch üblichen Operationseinstellungen ohne Abnahme der Permeabilität verzeichnet. Während der gesamten Versuchsdauer wurde kein Antiscalant dosiert.

Für die hier untersuchten Wasserbeschaffenheiten zeigte sich der Einsatz der Hohlfasernanofiltrationsmembran als geeignetes Verfahren zur PFAS-Entfernung. Um die Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit und langfristige Umsetzbarkeit der Technologie zu bewerten sowie neue Möglichkeiten beim Konzentratmanagement zu etablieren, sind in Zukunft weitere Studien erforderlich.

Danksagung

Die Autorinnen und Autoren danken dem DVGW für die finanzielle Unterstützung des Projekts (Förderkennzeichen W202304) und den beteiligten Wasserversorgungsunternehmen für die Bereitstellung der Infrastruktur und Mithilfe beim Betrieb der Pilotanlage sowie den Probenahmen. ■

Literatur

- [1] Umweltbundesamt: PFAS. Gekommen, um zu bleiben. Online unter: www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/2546/publikationen/uba_sp_pfas_web_0.pdf, abgerufen am 27. Januar 2026.
- [2] Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung – TrinkwV) vom 20. Juni 2023. Online unter: www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2023/TrinkwV.pdf, abgerufen am 27. Januar 2026.
- [3] Riegel, M., Sacher, F.: Bestandsaufnahme zur Betroffenheit der deutschen Trinkwasserversorgung durch die Einführung eines Trinkwassergrenzwertes für PFAS, Bonn 2021.
- [4] Riede, P., Lipp, P.: Kapillo-PFAS – PFAS-Entfernung mittels Hohl-faser-Nanofiltrationsmembranen zur Einhaltung neuer Grenzwerte, Bonn 2025.
- [5] Sewerin, T., Elshof, M., Matencio, S., Boerrigter, M., Yu, J., de Grooth, J.: Advances and Applications of Hollow Fiber Nanofiltration Membranes: A Review, in: Membranes, 2021.

Die Autoren

Patricia Riede ist wissenschaftliche Mitarbeiterin beim TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser in der Abteilung Wasserversorgung, Sachgebiet Struktur- und Technologiekonzepte.

Dr. Pia Lipp war wissenschaftliche Mitarbeiterin beim TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser in der Abteilung Wasserversorgung, Sachgebiet Struktur- und Technologiekonzepte.

Tim Sewerin ist Vertriebsingenieur bei NX Filtration.

Kontakt:

Patricia Riede

TZW: DVGW-Technologiezentrum Wasser

Karlsruher Str. 84

76139 Karlsruhe

Tel: 0721 9678-1927

E-Mail: patricia.riede@tzw.de

Internet: www.tzw.de

Begeistern Sie Nachwuchs für die Branche

Mit Ihrem Unternehmenslogo
individualisierbar



Perfekt zur Berufsorientierung:
Unsere Flyer liefern die wichtigsten Infos zu Ausbildung und Karriere – kompakt, ansprechend und für jeden Beruf maßgeschneidert. Bestens geeignet für Schulen, Messen oder Recruiting-Events. Sichern Sie sich jetzt Ihre Exemplare!



Jetzt in unserem
Shop bestellen

