

FITWAS

Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung zur Sicherung der Trinkwasserversorgung

Abschlussbericht Teil 1 Kurzbericht

Hamburger Wasserwerk GmbH
BMBF Förderkennzeichen 02WV1565B
Laufzeit: 01.02.2021 bis 30.09.2024

März 2025

Autorinnen/Autoren

HAMBURG WASSER
Hamburger Wasserwerke GmbH
Dorothea Mergel,
Elena Jacki

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02WV1565B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Polymermembran konnten im August 2022 gestartet und in 2023 erfolgreich abgeschlossen werden. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Versuchen mit Keramikmembran (Abschluss in 2024) wurde gemeinsam mit der DVGW-Forschungsstelle an der TUHH (DVGW-TUHH) durchgeführt und stellt ein wesentliches Ergebnis für die Zielerreichung dar.

3. Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Wesentliche Ergebnisse stellen die Resultate der Pilotversuche des AP 2.2 „Praxisversuche zur getauchten Membranfiltration“ dar. Hierzu haben die DVGW-TUHH und HW eng zusammengearbeitet. Die Erkenntnisse aus den Versuchen werden im Folgenden gegenübergestellt und zusammengefasst.

Tabelle 1 Vergleich der in den Membranpilotversuchen erzielten Ergebnisse

Polymermembran	Keramikmembran
Hohlfasermembran (PVDF, Porengröße: 0,04 µm, Membranfläche: 27,9 m ²) Zulauf: Trübung bis 1000 NTU, Eisen bis 200 mg/L	Plattenmodul (SiC, Porengröße 0,1 µm, Membranfläche: 6 m ²) Zulauf: (Trübung bis 1000 NTU, Eisen bis 200 mg/L
<u>Rückhalt:</u> Trübung > 99,9% Fe gesamt > 99,9% TOC > 92% DOC geringer Rückhalt	<u>Rückhalt:</u> Trübung > 99,9 % Fe gesamt > 99,8 % TOC > 89 % DOC geringer Rückhalt
Filtrat-Trübung < 0,2 NTU	Filtrat-Trübung < 0,2 NTU
Flux bis 60 L/m ² h getestet	Flux bis 150 L/m ² h getestet
97,6 % Ausbeute	99,2 % Ausbeute
<u>Funktionierende Reinigungsstrategie:</u> chemische Reinigung, Periodische Rückspülung, Zyklische Belüftung	<u>Funktionierende Reinigungsstrategie:</u> Backpulsing (Rückspül-Druckstoß), Feed-Durchmischung über dem Membranmodul

Es lässt sich festhalten, dass alle bei HW getesteten Verfahren für Spülwasserrecycling geeignet sind. Die Membranverfahren weisen hohe Ausbeuten (vgl. Tabelle 1) und stabile Filtratqualitäten auf, insbesondere im Vergleich zur Sandfiltration.

Eine Vorbehandlung des Spülwassers durch Sedimentation und kontinuierliche Belüftung des Membranmoduls erwies sich als unnötig. Tatsächlich sank die Permeabilität schneller ab, wenn große Partikel durch Sedimentation entfernt wurden oder kontinuierlich belüftet wurden. Vermutlich begünstigt eine sekundäre Filtrationsschicht aus größeren Eisen- und Manganpartikeln den Betrieb und verhindert die Verblockung der Membran durch kleinere Partikel.

Für das Ziel der Rückführung in den Rohwasserstrom der Trinkwasseraufbereitung muss das Filtrat mindestens Rohwasserqualität aufweisen, was sicher erreicht wurde. Generell lag die Filtratqualität in beiden Verfahren bereits im Bereich der Trinkwasserqualität. Die Nachschaltung einer UV-Desinfektion sollte entsprechend des DVGW-Regelwerks geprüft werden.

Beide Membransysteme zeigten eine geringe Foulinganfälligkeit gegenüber dem untersuchten Filterspülwasser v.a. bedingt durch die gut ausgeprägten Eisenflocken. Mit der Keramikmembran können deutlich höhere Filtratfluxe und Ausbeuten erreicht werden als mit der Polymermembran.

Bei der Schätzung der Gesamtkosten relativieren sich die höheren Membrankosten pro m² Membranfläche für die Keramikmembran aufgrund des höheren Filtratfluxes. Der Energiebedarf liegt für Polymer- und Keramikmembran in ähnlichem Bereich. Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Einsatz von Keramikmembranen zur Spülwasseraufbereitung bzgl. der Kosten konkurrenzfähig zu Polymermembranen ist und einige Vorteile, wie z.B. weniger Chemikalienverbrauch mit sich bringt.

4. Literatur

- [1] Lipp, P. (2007). Bestandsaufnahme zum Betrieb von MF/UF-Anlagen in der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland. TZW Schriftenreihe Band 33.
- [2] Lipp, P., Volquardsen, T. (2017). Klarwasserbehandlung mittels Ultrafiltration. Ergebnisse einer Pilotstudie. ATW-Beitrag, 159–165.
- [3] Reissmann, F. G., Uhl, W. (2006). Ultrafiltration for the reuse of spent filter backwash water from drinking water treatment. *Desalination* 198/1, 225–235.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.517>.
- [4] WAG Nordeifel mbH (2008). Teilprojekt 3: Wissenschaftliche Untersuchungen zur Inbetriebnahme und zum Langzeitverhalten der großtechnischen zweistufigen Membrananlage der TWA Roetgen, Abschlussbericht. https://cleanerproduction.de/Publikationen/02WT0660_-_Abschlussbericht.pdf.
- [5] Winkler, A., Winzenbacher, R. (2008). Behandlung schlammhaltiger Filterspülwässer mittels Ultrafiltration im Egau-Wasserwerk. Von der Grundlagenermittlung bis zum Betrieb. *gwf Wasser|Abwasser* 149 2, 133–141.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Wiederverwendung von Filterspülwässern

aus der Grundwasseraufbereitung

FITWAS

Wiederverwendung von Filterspülwässern
aus der Grundwasseraufbereitung zur
Sicherung der Trinkwasserversorgung

Abschlussbericht Teil 2 Eingehende Darstellung

Schlussbericht der Hamburger Wasserwerke GmbH

BMBF Förderkennzeichen 02WV1565B

Laufzeit: 01.02.2021 bis 30.09.2024

März 2025

Autorinnen/Autoren

HAMBURG WASSER (HW)

Hamburger Wasserwerke GmbH
Dorothea Mergel,
Elena Jacki

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen O2WV1565B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorinnen und Autoren.

Zur besseren Lesbarkeit wird nicht zwischen weiblichen und männlichen Berufsbezeichnungen unterschieden; es sind immer beide Geschlechter gleichberechtigt angesprochen.

Danksagung

Die dargestellten Ergebnisse wurden im BMBF-geförderten Verbundvorhaben FITWAS „Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung zur Sicherung der Trinkwasserversorgung“ erarbeitet. Für die Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme „Wassertechnologien: Wiederverwendung“ bedanken sich die Autoren im Namen des gesamten Projektverbundes. Die gute Betreuung durch den Projektträger Karlsruhe, namentlich die konstruktive und engagierte fachliche Betreuung durch Herrn Dr. Delay und administrative Betreuung durch Frau Köhler sei besonders herausgestellt.

Die Autoren bedanken sich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie Studierenden, die zum Gelingen des Verbundprojektes FITWAS beigetragen haben. Für die Übernahme der Eigenmittel des Teilprojektes der DVGW-Forschungsstelle TUHH danken wir dem DVGW. Besonderer Dank gilt der DVGW-Expertenbegleitrunde für die fachliche Unterstützung und die wertvollen Hinweise im Verlauf der Projektarbeiten. Den Partnern des Transferprojekts TransWavE danken wir für die angenehme Zusammenarbeit und ausgezeichnete Organisation der Vernetzungs- und Transferaktivitäten.

Inhalt

I.	Hintergrund und Ziel des Projektes.....	3
II.	Eingehende Darstellung des Projektes.....	4
II.1	Innovative Verfahrens- und Betriebsstrategien zur Filterspülwasser-Rückgewinnung (AP 1)	4
II.2	Praxisversuche zur Aufbereitung von Filterspülwässern (AP 2)	6
II.2.1	Standort der Praxisversuche	6
II.2.2	Durchführung der Praxisversuche	7
II.2.3	Ergebnisse der Praxisversuche	9
II.3	Qualität des rückgewonnenen Wassers und Wiederverwendbarkeit (AP 3).....	11
II.3.1	Rahmenbedingungen und Wiederverwendbarkeit.....	11
II.3.2	Qualität des aufbereiteten Spülwassers	12
II.4	Ergebnisverwertung (AP 5).....	13
II.5	Ergebnisse AP 6 Projektkoordination, Datenaustausch, Projekttreffen, Berichte.....	16
III.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	16
IV.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten.....	17
V.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse	18
VI.	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	20
VII.	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	21
VII.1	Begutachtete Publikationen.....	21
VII.2	Nicht begutachtete Publikationen.....	21
VII.3	Vorträge auf wissenschaftlichen Tagungen	21
VII.4	Poster-Publikationen auf wissenschaftlichen Tagungen.....	21
VII.5	Geplante Veröffentlichungen	21
VIII.	Anhang.....	22
VIII.1	Abkürzungsverzeichnis.....	22
VIII.2	Literaturverzeichnis	23
VIII.3	Abbildungsverzeichnis	24
VIII.4	Tabellenverzeichnis.....	24

I. Hintergrund und Ziel des Projektes

Die Wasserwiederverwendung ist heute auch in der Trinkwasserversorgung ein zentrales Thema. In Deutschland werden ca. 60 % des Trinkwassers aus Grundwasser gewonnen; der Anteil für Norddeutschland liegt sogar bei mehr als 80 % [1]. Der wesentliche Schritt bei der Grundwasseraufbereitung ist die Filtration zur Enteisenung und Entmanganung. Dabei fallen große Mengen Filterspülwasser an. Diese feststoffhaltigen, eisen- und manganhaltigen Spülwässer werden derzeit i.d.R. nach Absetzen der Feststoffe in den Vorfluter eingeleitet und gehen damit für die Trinkwasserversorgung verloren.

Die Filterspülwässer stellen ein großes Potenzial für die Wasserwiederverwendung dar. Deutschlandweit werden ca. 1–4 % des aufbereiteten Wassers für die Filtrerrückspülung verbraucht. Bei HAMBURG WASSER (HW) wurde der Anteil der Filterspülwässer durch Optimierung der Filterspültechnik bereits stark verringert, er lag 2021 bei 1,3 % bezogen auf die Rohwassermenge aller Werke. Zusammengerechnet für alle HW-Wasserwerke entspricht dies mit ca. 1,4 Mio. m³/Jahr immer noch einer bedeutenden Menge [2].

Ziel des FITWAS-Projektes war es, geeignete Verfahren zu ermitteln bzw. neue Verfahren z.B. mit Einsatz keramischer Membranen, zu entwickeln, mit denen Filterspülwässer aufbereitet und als Rohwasser in die Wasseraufbereitung zurückgeführt werden können. Damit soll die Verfügbarkeit von Trinkwasser erhöht werden und der Verlust von Spülwasser bei HW minimiert werden; insbesondere vor dem Hintergrund des Klimawandels mit konkreten Herausforderungen in der Wasserversorgung in den Sommermonaten (z.B. 2018 und 2019). Die Projektergebnisse sollen dabei helfen, die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten der verschiedenen Methoden zur Aufbereitung von Spülwasser zuverlässig zu bewerten.

Ein mögliches Verfahren zur Filterspülwasseraufbereitung ist die Membranfiltration, die seit etwa 20 Jahren zur Aufbereitung von Oberflächenwasser eingesetzt wird [3]. Es wurden bereits mehrere Pilotstudien zur Aufbereitung von Filterspülwässern mittels polymerbasierter Ultrafiltration durchgeführt, welche jedoch vorwiegend die Trinkwassererzeugung aus Oberflächenwasser [4]- [5] oder Quellwasser [6] betreffen. Bisher hat sich die Rückgewinnung des Filterspülwassers jedoch aus Kostengründen und z.T. aufgrund von Betriebsproblemen nicht etabliert. Keramische Membransysteme wurden wegen fehlender Betriebserfahrungen und hoher Investitionskosten bisher nicht pilotiert [6]. Auch bei HW wurden Vorversuche mit einer druckbetriebenen Polymermembran durchgeführt, welche aber aufgrund betrieblicher Herausforderungen keinen funktionierenden Betrieb darstellen und somit auch keine Datengrundlage für eine großtechnische Umsetzung liefern konnten.

Zur Wiederverwendung der Filterspülwässer wurden in FITWAS verschiedene Ultrafiltrations-Konzepte untersucht. Mit getauchten Membranen im Unterdruckbetrieb und Membranen im Druckbetrieb wurden Laborversuchen und Praxistests an drei Wasserwerksstandorten durchgeführt. Ein wichtiger Aspekt war dabei die Aufbereitungsleistung keramischer Membranen im Vergleich zu polymeren Membranen, woran in enger Zusammenarbeit von HW mit der DVGW-Forschungsstelle gearbeitet wurde. Fokus dieses Berichts sind die Versuche am Standort von HW. Infos zu den Versuchen an den anderen Standorten liefern die Abschlussberichte der Projektpartner Oldenburgisch-Ostfriesischer Wasserverband (OOWV) und der DVGW-Forschungsstelle an der TU Hamburg (DVGW-TUHH).

II. Eingehende Darstellung des Projektes

In den folgenden Kapiteln wird ein Fokus auf die durch HAMBURG WASSER (HW) bearbeiteten Arbeitspakete des Projektes gelegt. Ergebnisse aus Arbeiten der Projektpartner, welche diesen Arbeiten zugrunde liegen oder mit diesen verzahnt sind, werden ebenfalls zusammenfassend erläutert.

II.1 Innovative Verfahrens- und Betriebsstrategien zur Filterspülwasser-Rückgewinnung (AP 1)

In Voruntersuchungen (AP 1.2) wurde die Charakteristik von Filterspülwässern untersucht. In Tabelle 1 ist diese für den HW-Standort WW Süderelbmarsch (WW SEM), welches in II.2.1 detaillierter beschrieben wird, dargestellt und dem Rohwasser des Wasserwerks gegenübergestellt.

Tabelle 1 Charakteristik Filterspülwasser in Gegenüberstellung mit dem Rohwasser des Wasserwerks

	Parameter	Einheit	Filterspülwasser ¹⁾				Rohwasser ²⁾	
			Min.	Max.	Mittel	n	Mittel	n
Chemisch-Physikalisch	Trübung	NTU	310	1 738	764 ± 245	62	8,8 ± 6,0	2
	TS	mg/L	8	4.200	363 ± 516	70	3,2 ± 0,4	2
	Eisen gesamt	mg/L	23,6	495	112 ± 76,3	74	2,35 ± 0,28	24
	Eisen gelöst	mg/L	0,011	0,95	0,12 ± 0,18	39	0,52 ± 0,33	3
	Mangan gesamt	mg/L	0,25	10,2	2,44 ± 1,90	74	0,16 ± 0,04	23
	Mangan gelöst	mg/L	<0,005	0,18	0,12 ± 0,34	39	0,22 ± 0,02	3
	TOC	mg/L	2,70	41,0	15,4 ± 6,61	69	1,21 ± 0,24	21
	DOC	mg/L	0,63	2,52	1,90 ± 0,79	40	1,08 ± 0,33	3
	SAK 254	1/m	2,02	8,80	3,85 ± 1,18	40	7,41 ± 1,65	13
SAK 436	1/m	0,088	2,90	0,28 ± 0,22	40	2,39 ± 0,59	12	
Mikrobiologisch	<i>E.coli</i>	KBE/100 mL	n.n.	120	44 ± 38	16	n.n.	4
	Enterokokken	KBE/100 mL	n.n.	160	68 ± 365	16	n.b.	-
	Coliforme	KBE/100 mL	6	750	198 ± 177	16	n.n.	4
	Pseudo. Aerog.	KBE/100 mL	n.n.	n.n.	n.n.	12	n.b.	-
	KBE 20 °C	KBE/mL	177	2.573	547 ± 338	24	0,04 ± 0,21	225
	KBE 36 °C	KBE/mL	96	1.852	395 ± 287	24	0,24 ± 0,71	225
	Gesamtzellzahl	n/mL	1,0·10 ⁶	2,5·10 ⁷	1·10 ⁷ ± 6·10 ⁶	14	3·10 ⁵ ± 4·10 ⁵	3
¹⁾ Laboranalyse im Pilotierungszeitraum (August 2022 – Dezember 2023) ²⁾ Daten aus dem Monitoring (Oktober 2021 – 2022) am Wasserwerk Süderelbmarsch sowie z.T. aus ¹⁾ n. n. – nicht nachweisbar, n. b. nicht bestimmt								

In Laborversuchen (AP 1.3 und AP 1.4) wurden durch die DVGW-TUHH Verfahrensvarianten zur Membranfiltration untersucht. Da die Praxisversuche des AP 2 darauf aufbauen, werden diese im Folgenden kurz zusammengefasst. Eine detaillierte Darstellung der Laborversuche enthält der Bericht der DVGW-TUHH (Teilprojekt 02WV1565A).

Die Verfahrensvarianten zur Membranfiltration unterschieden sich neben dem Membranmaterial (Keramik und Polymer) hauptsächlich in der Modulart (Platte und Hohlfaser), der Filtrationsrichtung (Inside-out und Outside-in) und der Porengröße (Mikro- und Ultrafiltration). Ziel der Laborversuche war die Auswahl geeigneter Verfahrensvarianten, um diese anschließend in Pilotversuchen an zwei Wasserwerksstandorten mit unterschiedlichen Wassermatrizes in der Praxis zu testen. Die Verfahrensvarianten wurden unter konstantem Filtratflux im Dead-End-Betrieb mit kontinuierlich durchmischem Filterspülwasser getestet. Aus den Versuchen ging hervor, dass sich Membranverfahren im Inside-out-Betrieb nicht für diese Anwendung eignen. Durch das Filtrieren des feststoffhaltigen Filterspülwassers kommt es zur schnellen inneren Verstopfung der Membran, welche auch durch eine Rückspülung nicht ausreichend entfernt werden kann. [7]

Daher wurden für die Pilotversuche getauchte Membransysteme für eine Outside-In-Filtration gewählt. Durch den filtratseitig angelegten Unterdruck werden suspendierte Feststoffe aus dem Feed an der Membranoberfläche zurückgehalten und bilden eine dynamische Filterkuchenschicht. Diese Deckschicht hält auch Stoffe zurück, die kleiner als die Membranporen sind. Für die Tauchmodule wurden in den Labortests keine bzw. nur relativ geringe Anteile an irreversiblen Fouling beobachtet. Dies ist auf das untersuchte Filterspülwasser zurückzuführen, das hauptsächlich Makroflocken aus Eisen- und Manganhydroxiden enthält, welche die Membranporen nicht irreversibel verstopfen. [7]

Besonders bei den getesteten Keramikmembranen stellten sich vergleichsweise geringe Transmembrandrücke bzw. hohe Permeabilitäten ein. Dabei handelte es sich um zwei Plattenmembranen (Membranfläche $0,01 \text{ m}^2$) aus Siliziumcarbid (SiC) und Aluminiumoxid (Al_2O_3), die sich neben ihren Materialeigenschaften vor allem durch die größeren Poren der SiC-Membran unterschieden. Mit einer nominalen Porengröße von $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ liegt die SiC-Membran im Bereich zwischen Ultrafiltration und Mikrofiltration. Bei gleich hohem Rückhalt suspendierter Stoffe, wies die SiC-Membran etwa zehnmal höhere Permeabilitäten auf als die Al_2O_3 -Membran [8]. Folglich wurden für die hier beschriebenen Pilotversuche die SiC-Plattenmembran und eine polymere Hohlfasermembran verwendet. [7]

In vergleichbaren Studien wurde das Filterspülwasser häufig durch Sedimentation vorbehandelt und dann das Klarwasser filtriert, um die Membran hinsichtlich der Feststofffracht zu entlasten [4], [5]. In weiteren Voruntersuchungen wurde deshalb der Einfluss einer Sedimentation auf die Performance der Keramikmembranen untersucht. Dafür wurde durchmisches Filterspülwasser und Filterspülwasser, das durch eine 20-stündige Sedimentationszeit vorbehandelt wurde, zur Filtration gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass zwar der Filtrationswiderstand insgesamt für das Filterspülwasser nach vorangegangener Sedimentation niedriger war, jedoch war der irreversible Anteil höher als bei dem unbehandelten Filterspülwasser. Durch die Sedimentation werden vor allem die gut ausgebildeten Flocken abgetrennt, sodass vermutlich die verbliebenen kleineren Partikel die Membran verblocken [8]. Den negativen Einfluss der Submikrometer-Partikel in Filterspülwasser auf die Performance von keramischen Mikrofiltrationsmembranen ($0,5$ und $1 \text{ }\mu\text{m}$ Porendurchmesser) in der Filterspülwasseraufbereitung zeigte auch Huang et al. [9]. Reissmann und Uhl konnten in Pilotversuchen zur Filterspülwasserbehandlung mit einer polymeren Ultrafiltrationsmembran

ebenfalls keine betrieblichen Vorteile durch eine Sedimentation als Vorbehandlung feststellen [5]. Entsprechend wurde für die Pilotversuche das Filterspülwasser nicht vorsedimentiert.

II.2 Praxisversuche zur Aufbereitung von Filterspülwässern (AP 2)

II.2.1 Standort der Praxisversuche

Die Pilotversuche (AP 2.2) zur Untersuchung der drei Verfahren (Sandfiltration, Polymermembran, Keramikmembran) wurden am HW-Wasserwerk Süderelbmarsch (WW SEM) in Hamburg durchgeführt. An diesem Untersuchungsstandort werden täglich ungefähr 26.000 m³/d Grundwasser konventionell durch Belüftung mit einstufiger Schnellfiltration und anschließender Entsäuerung durch erneute Belüftung aufbereitet (Abbildung 1). Zur Rückspülung der Schnellfilter werden durchschnittlich 456 m³/d Trinkwasser verbraucht, was einem Anteil von circa 1,8 % entspricht. Bis zum Jahr 2010 wurde das Filterspülwasser konventionell unter Zugabe von Flockungshilfsmitteln in Absetzbecken über 17 h sedimentiert und das Klarwasser in den Vorfluter eingeleitet. [10]

Seitdem wurde auf eine alternative Filterspülwasseraufbereitung bestehend aus Flockung und anschließender Partikelabtrennung durch Lamellenklärer und DynaSandfilter umgestellt. Die Klarwasserphase wird weiterhin in den Vorfluter eingeleitet und der eisenhaltige Filterschlamm zur Geruchsbekämpfung in das Abwassersystem dosiert. Ein ehemaliges Absetzbecken dient seither als Speicherbecken, in welchem das Filterspülwasser durch technische Strömungserzeugung (u.a. mittels Strahljet) sequenziell durchmischt wird. [10]

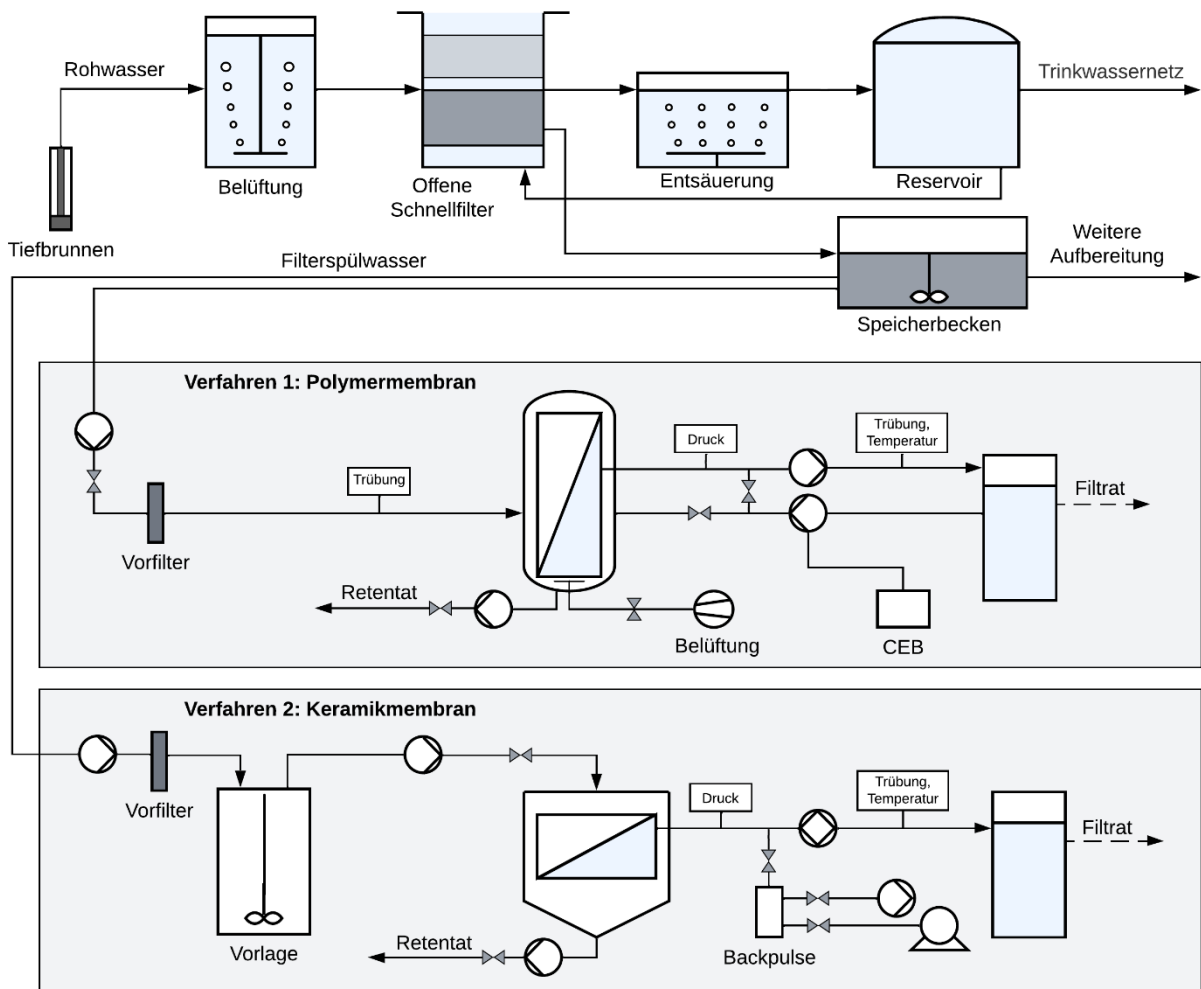


Abbildung 1 Verfahrensschemata Wasserwerk und Pilotanlagen [7]

II.2.2 Durchführung der Praxisversuche

Für die zwei untersuchten Membranverfahren wurde das durchmischte Filterspülwasser aus dem Speicherbecken jeweils über einen 3 mm Vorfilter direkt bzw. über eine Vorlage in den Filtrationstank gepumpt. Für die parallel geschalteten Sandfilter wurde das Filterspülwasser erst nach einer Sedimentationsstufe auf die Filtersäulen geleitet.

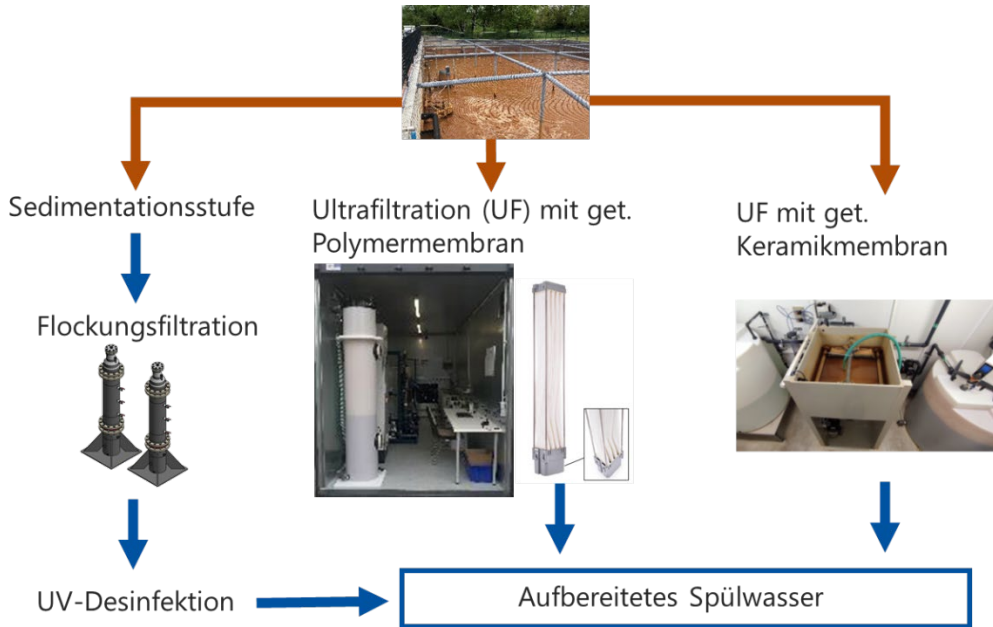


Abbildung 2 Schematische Darstellung zur Aufstellung der Versuchsanlagen am Wasserwerksstandort

Tabelle 2 zeigt die Charakteristik des Spülwassers bzw. den Zulauf zu den Versuchsanlagen, bei der Sandfiltration handelt es sich um das abgesetzte Spülwasser.

Tabelle 2 Charakteristik Zulauf zu den Versuchsanlagen

Parameter		Homogen. Spülwasser – Zulauf zu Membrananlagen			Abgesetztes Spülwasser – Zulauf zur Flockungsfiltration		
		Mittelwert	Standardabweichung	n	Mittelwert	Standardabweichung	n
Trübung	NTU	764	245	62	59	24	21
Eisen, gesamt	mg/L	112	76	74	6,5	2,4	21
Eisen, gelöst	mg/L	0,12	0,18	39	1,4	1,3	17
Mangan, gesamt	mg/L	2,4	1,9	74	0,1	0,05	21
Mangan, gelöst	mg/L	0,12	0,34	39	0,05	0,03	17
TOC	mg/L	15,4	6,6	69	2,1	0,3	21
DOC	mg/L	1,9	0,8	40	1,3	0,2	9
SAK 254	1/m	3,9	1,2	40	6,2	0,7	4
SAK 436	1/m	0,3	0,2	40	1,5	0,6	4

Bei beiden Membranverfahren wird das Filterspülwasser über eine getauchte poröse Membran durch Unterdruckfiltration aufbereitet. Für den Verfahrensvergleich wurden eine polymere

Hohlfasermembran (ZeeWeed 500 S) und eine keramische Plattenmembran (Cembrane) eingesetzt (Tabelle 3).

Tabelle 3 Daten zu den Membranmodulen mit polymeren Membranen und keramischen Membranen für die Pilotversuche im WW SEM

	Polymermembran	Keramikmembran
Membrantyp	Hohlfaser	Platte
Membranmaterial	PVDF	SiC
Nominale Porenweite¹⁾, in μm	0,04	0,1
Membranfläche, in m^2	27,9	6
Filtrationsrichtung	Outside-in	
Betriebsweise	Getaucht, Unterdruck	
Transmembrandruck, in bar	-0,9 bis 0,9	-0,7 bis 2,0 bar
pH-Bereich	2 bis 10,5	2 bis 12
Chemische Reinigung²⁾	CEB, CIP	CIP
1) Herstellerangaben		
2) CEB (Chemical Enhanced Backwash), CIP (Cleaning in Place)		

Zunächst wurden mit den getauchten Membranen (Polymer bzw. Keramik) Kurzzeitversuche über ca. sieben Tage zur Parametervariation durchgeführt. Anschließend wurden Langzeitversuche mit min. 14 Tagen Betriebsdauer durchgeführt.

Aus den Kurzzeitversuchen mit der Polymermembran ging hervor, dass eine Sedimentation zur Vorbehandlung ebenso wie eine kontinuierliche Belüftung des Membranmoduls keine betrieblichen Vorteile bringt. Im Gegenteil nahm die Permeabilität der UF mit vorgeschalteter Sedimentation schneller ab, vermutlich durch das Fehlen der großen Partikel, welche schnell eine sekundäre Filtrationsschicht auf der Membran bilden. Der Abtrag dieser Deckschicht durch eine kontinuierliche Belüftung wirkte sich ebenfalls langfristig negativ auf die Permeabilität aus. Folglich wurde für den Langzeitversuch auf eine Sedimentation verzichtet und die Belüftung nur unterstützend bei der Rückspülung verwendet. [11]

Das Konzentrat, welches sich im unteren Bereich des Filtrationstanks ansammelte, wurde in definierten Entleerungsintervallen abgepumpt. Zur Begrenzung des Foulings wurden die Membranen in regelmäßigen Abständen mit Filtrat rückgespült. Bei der Keramikmembran bestand zudem die Option zur hydraulischen Reinigung mittels Backpulsing. Dabei werden filtratseitig kurze Druckstöße auf die Membran gegeben, wodurch die Filtratausbeute maximiert und der Wasserverbrauch minimiert werden kann. [7]

Das Hohlfaser-Membranmodul (Polymer) wurde während der Rückspülung zusätzlich belüftet, um mit höheren Scherkräften Ablagerungen abzutragen. Die Polymermembran wurde im Betrieb alle drei Tage durch eine chemische Rückspülung (CEB) mit Säure und Natriumhypochlorit gereinigt. Bei der Keramikmembran wurde auf eine CEB verzichtet und das Membranmodul wurde nur zwischen den Versuchen durch Lagerung in saurer Reinigungslösung gereinigt (CIP). [7]

Zur Untersuchung der Flockungsfiltration wurden zwei Mehrschichtfilter mit unterschiedlichen Korngrößen in Parallelschaltung betrieben. Das abgesetzte Spülwasser wurde unter Zudosierung von Flockungsmittel (PAC – Polyaluminiumchlorid) auf die Sandfilter geschickt. Einen Überblick über die technischen Daten der Filtersäulen liefert Abbildung 3.

Filterfläche	0,06 m ²
Durchmesser Filtersäule	0,3 m

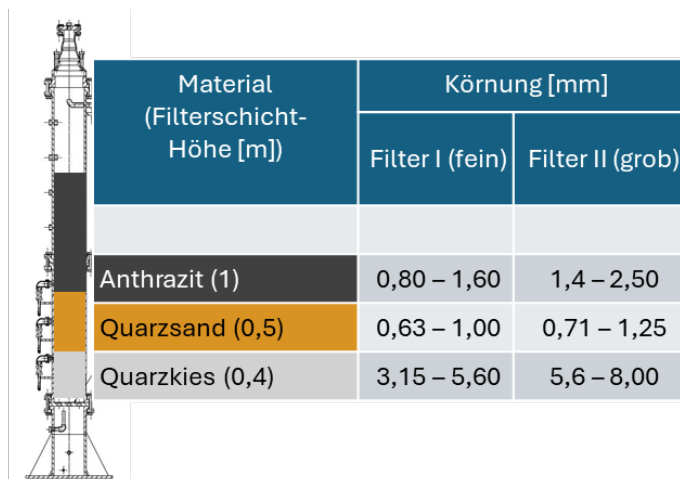


Abbildung 3 Schematische Darstellung Filtersäule

Der Fokus der Versuche lag auf Betriebsstabilität und der Qualität des Filtrats. In den Untersuchungen wurde die Flockungsmitteldosierung (0,2-0,5 mg/L Al) und Filtergeschwindigkeit (5-6 m/h) variiert. Die Trübung des Zulaufs lag im Mittel bei ca. 50 NTU, im Maximum bei 100 NTU.

II.2.3 Ergebnisse der Praxisversuche

Die Leistung der getauchten polymeren und keramischen Membranen in den Pilotversuchen im WW SEM ist in Tabelle 4 vergleichend zusammengefasst.

Tabelle 4 Vergleich der in den Pilotversuchen erzielten Ergebnisse für die Polymer- und Keramikmembran, Standort WW SEM [11]

	Polymembran	Keramikmembran
Rückhalt	>99 % Fe >97 % Mn >92 % TOC	>99 % Fe >95 % Mn >90 % TOC
Filtratqualität	<0,2 NTU	<0,2 NTU
Max. Filtratflux	60 L/(m ² ·h)	150 L/(m ² ·h)
Filtratausbeute	97,6 %	99,2 %
Chemischer Reinigungsaufwand	CEB (alle 3 Tage)	CIP

Für die Polymermembran erwies sich eine zweistufige chemische Rückspülung (CEB) mit Schwefelsäure bei pH 2-3 zur Entfernung der hauptsächlich anorganisch vorliegenden Foulants (Fe, Mn) und mit Natriumhypochlorit (80 ppm) als effiziente Reinigungsmethode. Im Langzeitversuch (19 Tage) konnte die Permeabilität mittels CEB im dreitägigen Intervall bei einem Filtratflux von 40 L/(m²·h) stabil gehalten werden [11]. Bei einer Steigerung der Filtratausbeute auf über 97,6 % wurde beobachtet, dass sich die abgelöste Deckschicht zwischen den Membranhohlfasern ansammelte und verfestigte, bis sich lehmartige Klumpen bildeten. Diese konnten durch eine intensive Belüftung allein nicht aufgelöst werden.

Ergänzend ist zu erwähnen, dass beim Test einer basischen Reinigung (CIP, pH 10,3) unter Verwendung des Filtrats und Natronlauge ein Permeabilitätsverlust der Membran festgestellt wurde, welcher vrs. auf Calciumcarbonat-Ausfällungen und komplexbildende Reaktionen in alkalischem Umfeld zurückzuführen ist. Für die Verwendung von Filtrat zur basischen Reinigung werden wasserchemische

Vorrechnungen zur Calcitsättigung empfohlen, um Permeabilitätsverluste durch Calcitausfällungen zu vermeiden.

Für die Keramikmembran erwies sich in den Kurzzeitversuchen der Backpulse als effiziente hydraulische Reinigungsmethode. Da im Gegensatz zur konventionellen Rückspülung wenig Filtrat verbraucht wird, lässt sich hiermit die Filtratausbeute deutlich steigern. Eine Membranbelüftung war bei dem verwendeten Aufbau nachteilig, weil dadurch das abgesetzte Konzentrat im unteren Bereich des Filtrationstanks aufgewirbelt wird. Hingegen war eine Durchmischung oberhalb des Membranmoduls wichtig, da es sonst schnell zur Verschlämung durch das Absetzen der Eisenflocken auf dem Modul kommt. Im Langzeitversuch wurde ein deutlich höherer Filtratflux von 150 L/(m²·h) im Vergleich zur Polymermembran und in Vergleichsstudien ([5] [6]) mit maximal 50 L/(m²·h) erreicht. Es wurde ohne CEB ein annähernd stabiler Betrieb bei einer Ausbeute von 99,5 % erreicht. [11]

Mittels Flockungsfiltration (Sandfiltration) wurde eine stabile Trübungsreduktion (< 0,3 NTU) bei Zulauftrübungen (<100 NTU) erzielt (im Mittel 50 NTU). Die Mindestmenge an Polyaluminiumchlorid (PAC) als Flockungsmittel für eine erfolgreiche Trübungsreduktion lag bei 0,27 mL/L PAC (0,3 mg/L Al). Druckschwankungen, ausgelöst durch die Betriebsweise der Pumpen und den Füllstand des Vorlagebehälters, haben die Filtratqualität negativ beeinflusst. Es wurden Laufzeiten von bis zu 110 h und Ausbeuten von 97 % (bezogen aufs Klarwasser) erreicht. Trübungsumbrüche stellten, bei vergleichsweise geringen Druckanstiegen im Filterbett, häufig das Laufzeitende einer Versuchsphase dar. Der Filter mit der feineren Körnung wies dabei erwartungsgemäß höhere Druckverluste auf. Die erzielten Filtratqualitäten nach den Filtern waren aus mikrobiologischer Sicht für eine Rückführung nicht geeignet. Durch die nachgeschaltete UV-Desinfektion konnten die mikrobiologischen Kontaminationen um 92 % (Koloniezahl 20/36 °C) bzw. 100 % (E.coli, Coliforme und Enterokokken) reduziert werden.

Die instabilere Filtratqualität sowie die Notwendigkeit einer Vorsedimentation des Spülwassers stellen Nachteile gegenüber einer Aufbereitung mit Membranverfahren dar. Ein geringerer Chemikalieneinsatz stellt einen Vorteil dar, vgl. Tabelle 5.

Tabelle 5 Gegenüberstellung Membranverfahren (Getauchte Polymermembran) und Flockungsfiltration (Sandfilter + UV-Desinfektion)

	Getauchte Polymermembran	Sandfilter + UV-Desinfektion
Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> - Verfahrensaufbau für Spülwasseraufbereitung geeignet - Hohe und stabile Filtratqualität: Trübung < 0,2 FNU (100%) - Ausbeute: 97,8 % 	<ul style="list-style-type: none"> - Verfahrensaufbau für Spülwasserrecycling (bedingt) geeignet - Relativ stabile Filtratqualität (geringfügige Schwankungen; Trübung < 0,3 NTU) - Mittlere Ausbeute ca. 97 % (Vorsedimentation nicht berücksichtigt)
Pro	<ul style="list-style-type: none"> - Stabile Filtratqualität unabhängig von Zulaufschwankungen (Rückhalt von desinfektionsresistenten Keimen wie Kryptosporidien und Giardien) - Kompakte Bauweise (können häufig in bestehende Gebäude nachgerüstet werden) - Keine Vorsedimentation des Spülwassers nötig - Weniger Platzbedarf (weniger Vorlagebeckenvolumen erforderlich, da kein Absetzen nötig) - Hoher Automatisierungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Anpassung bestehender Absetzbecken notwendig - Geringer Chemikalien (PAC) - Bedarf - "Einfache" und bekannte Verfahrensweise
Contra	<ul style="list-style-type: none"> - Chemikalieneinsatz für Reinigung - Für den Betrieb unbekanntere Technologie 	<ul style="list-style-type: none"> - Vergleichsweise instabile Filtratqualität (Eisen(III)-Filtration, Empfindlich ggü Druckschwankungen) - Vorsedimentation des Spülwassers erforderlich - Effektivität UV-Anlage abhängig von Filtratqualität - Höherer Platzbedarf (u.A. weil Absetzbecken weiterhin nötig sind) - Keine Entfernung resistenter Keime - Geringere Flexibilität bzgl. Schwankungen in der Zulaufqualität

II.3 Qualität des rückgewonnenen Wassers und Wiederverwendbarkeit (AP 3)

II.3.1 Rahmenbedingungen und Wiederverwendbarkeit

Die Rückführung des Filtrats darf gemäß DVGW-Arbeitsblatt 221-4 nur vor die partikelabtrennende Stufe des Wasserwerks erfolgen. Das Filtrat muss mindestens der Qualität des Rohwassers entsprechen, mikrobiell einwandfrei sein und darf die Trinkwasserqualität nicht beeinträchtigen. Wird das Spülwasser in offenen Absetzbecken aufgefangen, so muss der Einsatz einer UV-Desinfektion nach Aufbereitung und vor Rückführung in das Wasserwerk geprüft werden. [12]

In AP 3.1 wurden die zu untersuchenden und zu erzielenden Qualitätskriterien für Filterspülwasser sowie die Filterspülwässer für die Aufbereitung festgelegt. Tabelle 6 zeigt die festgelegten Parameter für die Untersuchung der Filterspülwässer und der Filtrate der Membranfiltration.

Tabelle 6 Zu untersuchende Parameter für die Filterspülwasser-Aufbereitung mittels Membranfiltration

Probenahmestelle	Parametergruppe	Parameter
Filtrat	physikalisch-chemisch	Trübung, Fe ges., Mn ges., SAK ₂₅₄ , SAK ₄₃₆ , TOC
		Fe gelöst, Mn gelöst, DOC, pH-Wert
	mikrobiologisch	Coliforme, E. coli, Enterokokken, Pseudomonas aeruginosa, KBE 20°C, KBE 36°C
Zulauf	physikalisch-chemisch	Abfiltrierbare Stoffe, Trübung, Eisen ges., Mn ges., TOC
		Fe gelöst, Mn gelöst, DOC, pH-Wert
	mikrobiologisch	Coliforme, E. coli, Enterokokken, Pseudomonas aeruginosa, KBE 20°C, KBE 36°C

Die Aufbereitung von Filterspülwässern mittels poröser Membranverfahren ist technisch gut umsetzbar. Es kann mit den untersuchten polymeren und keramischen Membranen eine sehr gute Filtratqualität erzielt werden, sowohl hygienisch als auch chemisch-physikalisch, sodass das Wasser potenziell als Rohwasser in das Wasserwerk zurückgeführt werden kann. Dabei werden hohe bis sehr hohe Ausbeuten erzielt. [11]

II.3.2 Qualität des aufbereiteten Spülwassers

Mit beiden Membranverfahren wurde während des gesamten Untersuchungszeitraums ein feststoff- bzw. trübstofffreies Filtrat erzeugt, unabhängig von den hohen Trübungsschwankungen im Anlagenzulauf. In Abbildung 4 sind die Filtratkonzentrationen beider Membranverfahren vergleichend dargestellt. Die Filtratqualität ist sehr gut und weist Konzentrationen meist deutlich unterhalb des Rohwassers auf. Generell liefert die Polymermembran etwas niedrigere Filtratkonzentrationen, was durch die kleinere Porenweite zu erklären ist. [11]

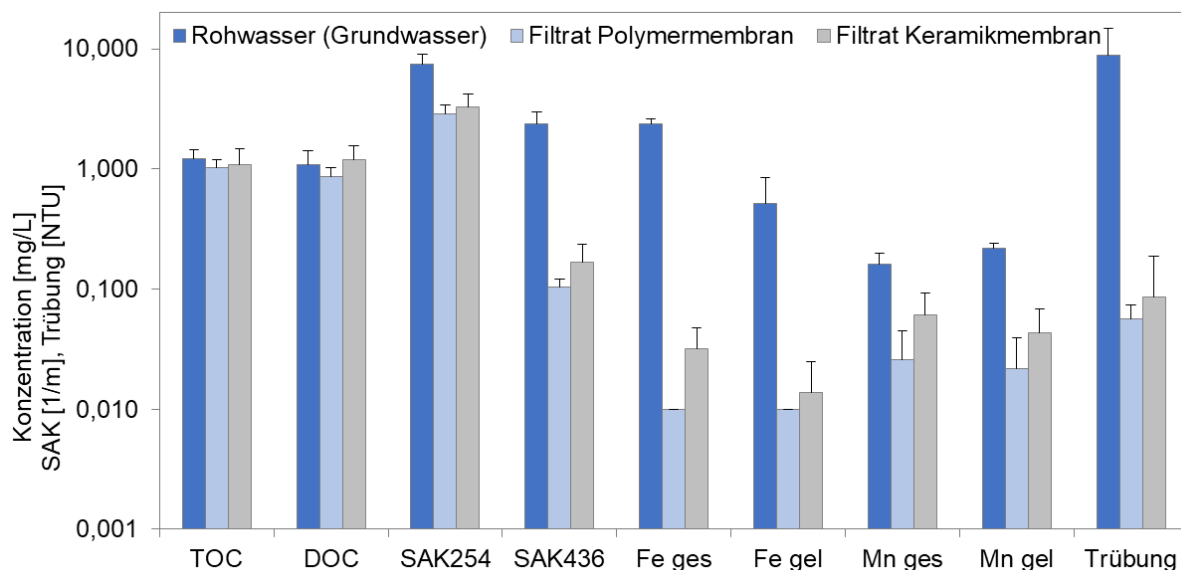


Abbildung 4 Vergleich der Filtratqualitäten mit der Rohwasserqualität des Wasserwerks

Bei der großtechnischen Umsetzung würde im Gegensatz zur Pilotanlage eine getrennte Leitungsführung und getrennte Tanks für die Filtratrückspülungen und den CEB (Chemical Enhanced Backwash) vorgesehen werden. Dies ist zum einen für die Sicherheit der Reinigung vorteilhaft, vor allem aber auch, um eine Verkeimung der Filtratseite der Anlage durch die Rückspülung von Filtrat aus dem Filtrationstank zu vermeiden.

II.4 Ergebnisverwertung (AP 5)

Der Einfluss der Filterspülwasserqualität überwiegt den Einfluss der Verfahrensvariante der Membranfiltration an den Pilotierungsstandorten des FITWAS-Projekts. Dementsprechend kann ein Vergleich verschiedener Verfahren nur für denselben Standort durchgeführt werden. Im Folgenden werden zwecks Ergebnisverwertung die beiden Membranverfahren u. A. unter Berücksichtigung ihres Energieverbrauchs für denselben Standort (WW SEM) wirtschaftlich bewertet (AP 5.4).

In Tabelle 7 werden die verfahrenstechnischen Aspekte der beiden Membranverfahren bewertend gegenübergestellt. Beide Systeme zeigten eine geringe Foulinganfälligkeit gegenüber dem Filterspülwasser des Standortes, v.a. bedingt durch die gut ausgeprägten Eisenflocken. Mit der Keramikmembran konnten in der Pilotierung deutlich höhere Filtratfluxe und Ausbeuten erreicht werden als mit der Polymermembran, welches in der folgenden Kostenschätzung berücksichtigt wird.

Tabelle 7 Vergleich verfahrenstechnischer Aspekte der Verfahren mit Polymer und Keramikmembran

Kriterium	Polymermembran		Keramikmembran	
	Bewertung	Wert	Bewertung	Wert
Rückhalt	++	>99 % Fe >97 % Mn >92 % TOC	++	>99 % Fe >95 % Mn >90 % TOC
Filtratqualität	++	<0,2 NTU	++	<0,2 NTU ¹⁾
Max. Filtratflux	+	60 L/(h·m ²)	++	150 L/(h·m ²)
Filtratausbeute	+	97,6 %	++	99,2 %
Chemischer Reinigungsaufwand	+	CEB (alle 3 Tage)	+	CIP
Membranfläche pro m² Aufstellfläche	++	99 m ² /m ²	++	86 m ² /m ²
Membrankosten	+	80 €/m ²	--	267 €/m ²

Abbildung 5 zeigt die Kostenschätzung für eine großtechnische Ultrafiltration basierend auf den Pilotversuchen (AP 2), als spezifische Kosten (Abschreibung und Betriebskosten) bezogen auf das aufbereitete Spülwasservolumen.

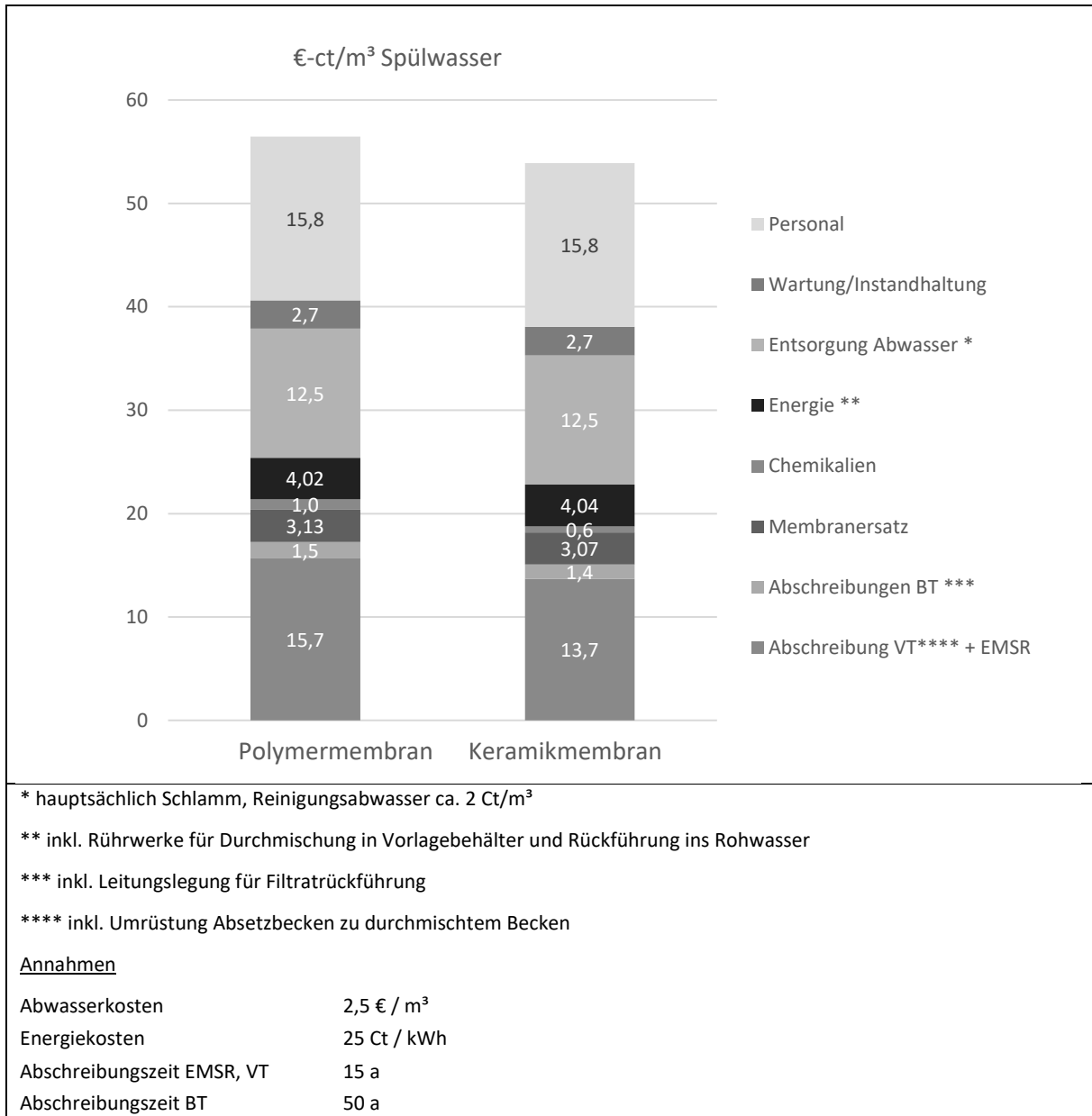


Abbildung 5 Kostenvergleich von Polymer- und Keramikmembran

Kosten für die Einbindung ins Leitsystem des Wasserwerks basieren auf hochgerechneten Erfahrungswerten von HW. Die Kosten beider Verfahren liegen in einem ähnlichen Bereich von 50-60 Ct/m³ Spülwasser, bei einer jährlichen Rückgewinnung von ca. 140.000 m³/a Wasser zur Nutzung als Rohwasser im WW SEM.

Beim Vergleich der Anlagen ist folgendes zu berücksichtigen: Die erforderliche Membranfläche basiert auf dem Filtratflux aus den Pilotversuchen und einer Tagesmenge von 400 m³/d (40 L/(m²·h) mit 432 m² Membranfläche für Polymer bzw. 120 L/(m²·h) mit 144 m² Membranfläche für Keramik). Entsprechend der verfügbaren Module ist die tatsächliche Membranfläche der Anlagen größer (571 m² und 168 m²). Im betrachteten Fall ergibt sich hierfür bei der Polymermembran ein höherer möglicher Durchsatz (23 - 34 m²/h mit Flux 40 – 60 L/(m²·h)) als bei der Keramikmembran (20 - 25 m²/h mit Flux 120-150 L/(m²·h)). [11]

Bei den Membrankosten muss für die Keramikmembran mit ca. dreimal so hohen Kosten pro m² Membranfläche gerechnet werden. Allerdings relativieren sich die absoluten Membran- und damit

Investitionskosten aufgrund des höheren Filtratfluxes für die Keramikmembran (in VT berücksichtigt). Des Weiteren ist deshalb für die Keramikmembran weniger Stellfläche und eine geringfügig kleinere Halle nötig (in BT enthalten). Für die Membranersatzkosten wird jeweils eine Lebensdauer von zehn Jahren angesetzt. Diese wird von den Herstellern so angegeben, kann aber in der Praxis (vermutlich insbesondere für die Keramikmembran) deutlich länger sein. Vorteile für das Keramikmembranverfahren zeigen sich außerdem in einem geringeren Chemikalienverbrauch. Da die Reinigungen weitestgehend automatisiert ablaufen, wird trotz unterschiedlicher Reinigungsintervalle mit dem gleichen Personalaufwand gerechnet. [11]

Der Energiebedarf liegt für beide Membrantypen wie zu erwarten im gleichen Bereich. Für den Pilotierungsstandort wird dieser auf 0,2 kWh/m³ inkl. Filtratrückführung und Durchmischung des Filterspülwassers geschätzt. Die Grundwasserförderung bei HW benötigt im Mittel 0,1 – 0,3 kWh/m³, d.h. die Spülwasseraufbereitung ist bzgl. Energiebedarf konkurrenzfähig.

Die Abwasserentsorgungskosten fallen ebenfalls etwa gleich aus, da das Retentat (Schlamm) die Hauptposition bildet. Für die Kostenberechnung wurde für beide Anlagen mit einer Ausbeute von 95% gerechnet. Mit der Keramikmembran sind tendenziell höhere Ausbeuten möglich. Da der Schlamm aber bei HW für die Entsorgung oder Weiterverwertung pumpfähig sein soll, wurde mit derselben Ausbeute gerechnet. [11]

Entsorgungskosten für den Schlamm sind nicht in der Kostenschätzung enthalten. Der Schlamm muss in den meisten Fällen auch ohne Spülwasserrecycling und bei bisheriger Aufbereitung über Absetzbecken (nach Ableitung des Klarwassers) entsorgt werden. Durch die Anwendung von Membrantechnik werden sich die Schlammmenge und damit die Entsorgungskosten im Vergleich zu konventioneller Aufbereitung (Absetzbecken) voraussichtlich verringern. Diese Einsparung ist ebenfalls nicht berücksichtigt. [11]

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Einsatz von Keramikmembranen zur Spülwasseraufbereitung bzgl. der Kosten konkurrenzfähig zu Polymermembranen ist und sogar einige Vorteile (z.B. weniger Chemikalienverbrauch) mit sich bringt.

II.5 Ergebnisse AP 6 Projektkoordination, Datenaustausch, Projekttreffen, Berichte

Die von der DVGW-TUHH durchgeführte Projektkoordination (AP 6.1) war in der ersten Projekthälfte stark durch die Maßnahmen zur Eindämmung der COVID-Pandemie beeinflusst. Ein Projekttreffen musste daher virtuell durchgeführt werden. Es wurden insgesamt 7 Projekttreffen und eine Abschlussveranstaltung durchgeführt.

Die FITWAS Projektpartner haben jeweils das Projekt auf den Veranstaltungen des Vernetzungsvorhabens (AP 6.2) präsentiert.

Die Poster der Veranstaltungen und die Newsletter-Beiträge sind auf der WavE-Website (bmbf-wave.de/Verbundprojekte+nach+Themenfeldern/Industrielles+Wasser/FITWAS.html) und der FITWAS Website (www.tuhh.de/wwv/fitwas) zu finden.

III. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Folgenden wird auf die drei wichtigsten Positionen (insgesamt >90% der Gesamtkosten) des zahlenmäßigen Nachweises eingegangen:

Den größten Teil der Projektkosten des Teilprojektes von HAMBURG WASSER stellen die Personalkosten dar, welche für die Planung und Betreuung der Pilotanlagen, die Koordination mit den Projektpartnern sowie die Ergebnisgegenüberstellung aufgewendet wurden. An zweiter Stelle stehen die Kosten für die zwei Versuchsanlagen, welche die Voraussetzung für die Praxisversuche bildeten. Hinzu kommen an dritter Stelle die Kosten für die Analytik der Proben (innerbetriebliche Leistungen) zur kontinuierlichen Auswertung der Performance der Versuchsanlagen und erzielten Wasserqualität.

IV. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Kompetenz von HAMBURG WASSER umfasst ergebnisorientierte Aufgaben für die zuverlässige Sicherstellung der Trinkwasserversorgung der Einwohner Hamburgs und der Metropolregion. Die durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des FITWAS-Projekts gehören nicht zur Kerntätigkeit von HAMBURG WASSER (HW). Forschungs- und Entwicklungsprojekte sind von hoher Wichtigkeit sowohl für HW, als auch für andere Wasserversorger und die Allgemeinheit. Das Ergebnis und der Erfolg solcher Forschungsvorhaben sind jedoch offen, wodurch ein wirtschaftliches Risiko entsteht und HW die entstehenden Projektkosten nicht vollständig durch Eigenmittel decken kann. Um sich auf zukünftige Herausforderungen und Technologien vorzubereiten und sich an der Weiterentwicklung der Trinkwasserverfügbarkeit zu beteiligen, hat HW eine Zuwendung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) in Höhe von 50 % für Sach-, Personal- und Reisekosten beantragt.

Mit Hilfe der Förderung konnten Ergebnisse erzielt werden, die neue Erkenntnisse für die Wasserversorgung liefern. Diese sind bei den Ergebnispräsentationen (vgl. Kapitel VII), insbesondere der FITWAS-Abschlussveranstaltung in Hamburg, dem DVGW-online-Seminar und den Präsentationen beim 22. Forum Wasseraufbereitung des TZW, sowie beim Trinkwasserkolloquium der DVGW-TUHH bereits auf großes Interesse bei den Wasserversorgungsunternehmen und Anlagenbau-/Planungsunternehmen gestoßen. Die Ergebnisverwertung wird über das Projekt hinaus von den Projektpartnern weitergeführt. Bei HAMBURG WASSER werden beispielsweise weitere Pilotversuche durchgeführt und die großtechnische Umsetzung wird detailliert geprüft.

V. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

HAMBURG WASSER (HW) versorgt rund 2 Millionen Kunden mit Trinkwasser. Für die Zukunft geht HW von steigenden Trinkwasserbedarfen in Hamburg aus. Gründe dafür sind das anhaltende Wachstum der Bevölkerung sowie mögliche Folgen des Klimawandels: Hitze- und Trockenphasen führen zu steigender Nachfrage, insbesondere im Hochsommer. Vor diesem Hintergrund besteht die Notwendigkeit die Trinkwasserverfügbarkeit zu erhöhen und das Ziel den Verlust von Filterspülwasser zu minimieren. Der prozentuale Anteil der Filterspülwässer beträgt bei HW ca. 1,3 % bezogen auf die Rohwassermenge aller Werke. Zusammengerechnet für alle HW-Wasserwerke entspricht dies mit ca. 1,4 Mio. m³/Jahr einer bedeutenden Menge. Für dieses Wasser wurde bereits Pumpenergie aufgewendet und Grundwasserentnahmegebühr bezahlt, fallweise kommen Entsorgungskosten hinzu. Ausgehend von der absoluten Wassermenge besteht zu Zeiten hoher Wasserabgabe auch das höchste Potenzial der Wasserrückgewinnung, da es sich um prozentuale Verluste handelt. Einen Überblick über die Verwertung der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans liefert Tabelle 8.

Tabelle 8 Überblick über die Verwertung der Projektergebnisse

Art der Verwertung	Umsetzung
Veröffentlichung, breite Öffentlichkeit	Beitrag für das Hamburg Journal des NDR, Ausstrahlung 30.01.2023: Hamburg morgen: Wie "FitWas" Millionen Liter Wasser sparen will NDR.de - Fernsehen - Hamburg Journal. Beitrag in der ZDF-Reihe plan b, Ausstrahlung 19.08.2023: <u>Steter Tropfen, Wasser sparen und bewahren.</u>
Veröffentlichung, Fachöffentlichkeit	Diverse Vorträge und wissenschaftliche Publikationen, siehe Kapitel VII.
Fachlicher Austausch in der Branche	Thematisierung in regelmäßigem Austausch mit anderen Wasserversorgern (u.A. BWB), sowie auf Tagungen und auf Nachfrage
Nachwuchsarbeit	Zwei Traineearbeiten, drei Abschlussarbeiten
Umsetzung einer großtechnischen Anlage	Prüfung auf Basis der Projektergebnisse in Bearbeitung
Prüfung des Einsatzes auf 15 Wasserwerksstandorten von HW	Prüfung auf Basis der Projektergebnisse in Bearbeitung
Gremienarbeit	Beteiligung von FITWAS-Projektmitarbeitenden in den DVGW-Gremien

Die Ergebnisse des FITWAS-Projektes bilden eine entscheidende Grundlage, um die großtechnische Realisierung der Rückgewinnung von Spülwasser bei HAMBURG WASSER zu überprüfen. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse aus dem FITWAS-Projekt werden die HW-Wasserwerke derzeit hinsichtlich ihrer Eignung für das Spülwasserrecycling bewertet. Hierbei werden u. a. die anfallende Spülwassermenge, sowie ggf. anstehende Modernisierungen der Standorte einbezogen. Eine Erweiterung zum Spülwasserrecycling wird anstehenden Maßnahmen z.B. der Sanierung von Absetzbecken gegenübergestellt und bei Entscheidungen zur Weiterentwicklung der Standorte

berücksichtigt. Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten werden als hoch eingeschätzt, sind aber sehr stark abhängig von den konkreten Bedingungen am jeweiligen Wasserwerksstandort. Aus diesem Grund werden an einem von HW priorisierten Standort weitere Pilotversuche auf Basis der Projektergebnisse durchgeführt.

Mitarbeiter von HW sind persönlich in DVGW-Gremien aktiv, die das Regelwerk und technische Merkblätter für die Unternehmen der deutschen Wasserwirtschaft entwickeln und regelmäßig aktualisieren. Damit ist die Berücksichtigung der Erkenntnisse, sowie der Zugang für alle Multiplikatoren (WVU, Industrieunternehmen, DVGW-eigene Forschungsinstitute) gesichert.

VI. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit sind keine anderen Forschungsvorhaben zum Thema der Filterspülwasseraufbereitung mittels Membranfiltration bekannt geworden.

Es gibt aber über den Membranhersteller Cembrane und mehrere Anlagenbauunternehmen Bemühungen, die keramische Membranfiltration für die Filterspülwasseraufbereitung als Option bekannt zu machen. Die FITWAS Ergebnisse wurden dabei auch von Cembrane genutzt. In einem Online-Seminar im August 2024 wurden erste Anwendungen in Dänemark (Split-Water Nordic), Polen (EMI Ustron) und Australien (Fa. Aquavoda) präsentiert.

VII. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

VII.1 Begutachtete Publikationen

Kast, C.; Mergel, D.; Wiegand, M.; Mutis, M.; Wendler, B.; Ernst, M. (2024): Aufbereitung von Filterspülwasser - Keramik- und Polymermembran im Vergleich, gwf-Wasser|Abwasser 07-08|2024, S. 77 - 86, doi.org/10.17560/gwfw.v165i07-08.2743

VII.2 Nicht begutachtete Publikationen

Wendler, B.; Kast, C.; Mergel, D.; Jacki, E.; Tiemann, Y.; Matoba, M.; Ernst, M.: „Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung - Aufbereitungskonzepte mit polymeren und keramischen Membranen (FITWAS)“, Beitrag im GWA Band 259, Aachen 2025, ISBN 978-3-938996-65-2

VII.3 Vorträge auf wissenschaftlichen Tagungen

Gemeinsamer Vortrag „Pilotversuche zur Wiederverwendung von Filterspülwasser mittels Membranfiltration“ durch DVGW-TUHH und HW auf der DVGW-Arbeitssitzung Trinkwasser 2023 in Hamburg, 30. November 2023

Vortrag „Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung zur Sicherung der Trinkwasserversorgung (FITWAS) – Ergebnisse Pilotversuche mit getauchten Membranen“ durch HW beim 22. Forum Wasseraufbereitung (TZW, DVGW) in Karlsruhe, 26. September 2024

Vortrag „Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung zur Sicherung der Trinkwasserversorgung (FITWAS) – Ergebnisse Pilotversuche mit getauchten Membranen“ durch HW beim 28. Trinkwasserkolloquium der DVGW-Forschungsstelle an der TUHH in Hamburg, 13. Februar 2025

Vortrag „Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung - Aufbereitungskonzepte mit polymeren und keramischen Membranen (FITWAS)“ auf der 58. Essener Tagung für Wasserwirtschaft, 26. – 28.03.2025

VII.4 Poster-Publikationen auf wissenschaftlichen Tagungen

Posterbeitrag und Beitrag im Tagungsband: „Charakterisierung und Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung“ bei der „Wasser 2022“ der Gesellschaft Deutscher Chemiker GDCh (online, 23. - 25. Mai 2022)

VII.5 Geplante Veröffentlichungen

Wendler, B.; Kast, C.; Mergel, D.; Jacki, E.; Tiemann, Y.; Matoba, M.; Ernst, M.: „Wiederverwendung von Filterspülwässern aus der Grundwasseraufbereitung - Aufbereitungskonzepte mit polymeren und keramischen Membranen (FITWAS)“, geplanter Beitrag in gwf-Wasser|Abwasser

VIII. Anhang

VIII.1 Abkürzungsverzeichnis

CEB:	Chemical Enhanced Backwash: chemisch unterstütztes Rückspülen.
CIP:	Cleaning In Place, Reinigen der Membran in der Anlage mit Chemikalien.
DOC:	Dissolved Organic Carbon (dt.: gelöster organischer Kohlenstoff)
DVGW:	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
DVGW:	Deutscher Verein für das Gas- und Wasserfach
HW:	HAMBURG WASSER
HWW:	Hamburger Wasserwerke GmbH
MWCO:	Molecular Weight Cut-Off
POC:	Particulate Organic Carbon (dt.: partikulärer organischer Kohlenstoff)
SDI:	Silt Density Index (dt.: Schwemmstoffdichte-Index)
SFBW:	Spent Filter Backwash Water
TR:	Trockenrückstand, Anteil der Trockenmasse an der gesamten Masse eines Schlamms.
TS:	Trockensubstanzgehalt, Anteil der Trockensubstanz (auch Trockenmasse) nach Trocknung z.B. von Schlamm, volumenbezogen.
TSS:	Total Suspended Solids, abfiltrierbare Stoffe
UF:	Ultrafiltration
WVU:	Wasserversorgungsunternehmen
WW:	Wasserwerk

VIII.2 Literaturverzeichnis

- [1] B. e.V., Wasserwirtschaft in Deutschland - Karten. Wassergewinnung in Deutschland., 2024.
- [2] Hamburg Wasser, „Umwelterklärung 2022,“ <https://www.hamburgwasser.de/fileadmin/Redakteur/Downloads/umwelterklaerung/en/Umwelterklaerung-emas-2022.pdf>, 2023.
- [3] P. Lipp, Bestandsaufnahme zum Betrieb von MF/UF-Anlagen in der öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland, TZW Schriftenreihe Band 33, 2007.
- [4] P. V. T. Lipp, „Klarwasserbehandlung mittels Ultrafiltration. Ergebnisse einer Pilotstudie.,“ *ATW-Beitrag*, pp. 159-165, 2017.
- [5] F. U. W. Reissmann, „Ultrafiltration for the reuse of spent filter backwash water from drinking water treatment.,“ *Desalination*, Bd. 198, Nr. 1, pp. 225-235, 2006.
- [6] A. W. R. Winkler, „Behandlung schlammhaltiger Filterspülwässer mittels Ultrafiltration im Egau-Wasserwerk. Von der Grundlagenermittlung bis zum Betrieb.,“ *gwf Wasser / Abwasser*, Bd. 149, Nr. 2, pp. 133-141, 2008.
- [7] C. Kast, D. Mergel, M. Wiegand, M. Mutis, B. Wendler und M. Ernst, „Aufbereitung von Filterspülwasser - Keramik- und Polymermembran im Vergleich,“ *gwf-Wasser / Abwasser*, pp. 77-86, 07-08 2024.
- [8] C. W. B. E. M. Kast, „Performance of Ceramic Membranes for Reuse of Spent Filter Backwash Water,“ in *Conference Proceedings Melpro*, 2022.
- [9] C. L. J.-L. W. C. L. C. C. Huang, „Recycling of spent filter backwash water using coagulation-assisted membran filtrations: effects of submicrometre particles on membrane flux.,“ *Water Science and Technology*, Bd. 61, Nr. 8, pp. 1923-1929, 2010.
- [10] Hamburg Wasser, „Rundumerneuerung des Wasserwerks Süderelbmarsch - Teil 2. Verfahrensumstellung der Spülwasserbehandlung,“ *energie / wasser praxis* 3, pp. 10-14, 2016.
- [11] B. Wendler, *GWA Band 259*, Aachen: ISBN: 978-3-938996-65-2, 2025.
- [12] DVGW, Rückstände und Nebenprodukte aus Wasseraufbereitungsanlagen. Teil 4: Nutzung von schlammhaltigen Wässern aus der Trinkwasseraufbereitung, WVGW-Verlag, 2016.
- [13] WAG Nordeifel mbH, „Teilprojekt 3: Wissenschaftliche Untersuchungen zur Inbetriebnahme und zum Langzeitverhalten der großtechnischen zweistufigen Membrananlage der TWA Roetgen, Abschlussbericht.,“ 2008.

VIII.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Verfahrensschemata Wasserwerk und Pilotanlagen [7]	6
Abbildung 2 Schematische Darstellung zur Aufstellung der Versuchsanlagen am Wasserwerksstandort	7
Abbildung 3 Schematische Darstellung Filtersäule	9
Abbildung 4 Vergleich der Filtratqualitäten mit der Rohwasserqualität des Wasserwerks	13
Abbildung 5 Kostenvergleich von Polymer- und Keramikmembran	14

VIII.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Charakteristik Filterspülwasser in Gegenüberstellung mit dem Rohwasser des Wasserwerks.....	4
Tabelle 2 Charakteristik Zulauf zu den Versuchsanlagen	7
Tabelle 3 Daten zu den Membranmodulen mit polymeren Membranen und keramischen Membranen für die Pilotversuche im WW SEM...	8
Tabelle 4 Vergleich der in den Pilotversuchen erzielten Ergebnisse für die Polymer- und Keramikmembran, Standort WW SEM [11]	9
Tabelle 5 Gegenüberstellung Membranverfahren (Getauchte Polymermembran) und Flockungsfiltration (Sandfilter + UV-Desinfektion) ...	11
Tabelle 6 Zu untersuchende Parameter für die Filterspülwasser-Aufbereitung mittels Membranfiltration	12
Tabelle 7 Vergleich verfahrenstechnischer Aspekte der Verfahren mit Polymer und Keramikmembran	13
Tabelle 8 Überblick über die Verwertung der Projektergebnisse.....	18