

Biofilmresistente Membranen

Abwasserrecyclingverfahren Dr. Fülling



Angefertigt in der Fakultät 4. Mathematik und Naturwissenschaft
der Bergischen Universität Wuppertal
Lehrstuhl für Management chemischer Prozesse in der Industrie
und Analytische Chemie

vorgelegt von Antonio Fontana (M.Sc.)

31. Mai 2023

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Leistungsfähigkeit, der Integrität und der Reinigung von biofilmresistenten Membranen der Firma GUM. Letztere wurden über neun Jahre in einer Recyclinganlage für industrielles Abwasser der ehemals größten Druckerei Europas eingesetzt. Die Recyclinganlage ermöglichte der Firma Prinovis in Nürnberg langfristig das anfallende Abwasser in Wasser aufzubereiten, welches den Anforderungen an Trinkwasserqualität gerecht wurde. Die untersuchten Membranen bewirkten nach der biologischen Stufe, bestehend aus einer Kläranlage und einem Biofilter, Salze und biologisch nicht abbaubare Stoffe abzutrennen. Die Membranen zeichnen sich durch ihre spezielle Oberflächenmodifizierung aus, weswegen sie durch *Biofouling* nicht verblocken und daher im industriellen Einsatz betriebssicher bei niedrigem Druck arbeiten.

Nach der Schließung der Firma Prinovis wurde im Rahmen einer Studienarbeit, die in Kombination mit der biologischen Stufe eingesetzte Membrananlage, einschließlich der biofilmresistenten Membranen, in der Firma GUM zum Zwecke der Evaluierung der zu untersuchenden Parameter durch die Universität Wuppertal aufgebaut. Nach der ausstehenden Reinigung zum Entfernen der Calcium-, Eisen- und Bariumsulfatbeläge wurde nahezu die gleiche Leistung in Bezug auf die Permeabilität wie bei Inbetriebnahme im Jahr 2012 erreicht, ohne dass eine signifikante Änderung der Integrität eingetreten ist. Ebenso zeigt die Untersuchung der Universität Wuppertal Optimierungen zur Entfernung der anorganischen Ablagerungen auf.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Recyclingverfahren Dr. Füllung	3
2.2	Recyclinganlage Fa. Prinovis in Nürnberg	4
2.3	Betrieb der Membrananlage Fa. Prinovis in Nürnberg.....	6
3	Material und Methoden	9
3.1	Membrananlagen	9
3.2	Analytische Methoden.....	11
3.3	Materialien.....	11
4	Ergebnis und Diskussion	12
4.1	Prüfanlage.....	12
4.2	Technikumsanlage.....	22
5	Zusammenfassung und Ausblick	32
6	Literaturverzeichnis	33
7	Anlage	30
7.1	Anlage 1	30
7.2	Anlage 2	42
7.3	Anlage 3.....	59

1 Einleitung

Durch anhaltende Dürreperioden mit einhergehender Wasserknappheit und zunehmendem Interesse die natürlichen Ressourcen im Sinne der Nachhaltigkeit zu erhalten, erlangt in der Gesellschaft das Thema rund um Wasserrecycling eine höhere Bedeutung. Der Begriff des Wasserrecyclings umfasst eine Wiederverwendung von bereits genutztem Wasser und bietet für verschiedene Wirtschaftssektoren neben sozialen und ökologischen Aspekten eine Vielzahl an Vorteilen. Zum einem kann die Industrie erhebliche Kosteneinsparungen erzielen, da der Bedarf an Frischwasser und die Entsorgungskosten für Abwasser reduziert werden. Zum anderem kann Wasserrecycling dazu beitragen, die Produktion und die Effizienz der Industrie zu steigern, welche oftmals durch die Begrenzung der Wasserentnahme aus Brunnen oder durch die Begrenzung der Einleitung von Abwasser in den Kanal limitiert wird.

Das Wasserrecycling ist in den meisten Fällen nur mit einer Kombination von geeigneten Verfahren und Technologien möglich, wie z.B. biologische und/oder chemische Behandlungen und Membrantechnologien. Das recycelte Wasser muss meist den Anforderungen an die Trinkwasserqualität erfüllen, da Wasser mit schlechterer Qualität in einen industriellen Prozess beispielsweise zu Korrosionen, Ablagerungen oder Biofilmen führen und so die Sicherstellung der Prozessführung gefährden könnte.^[1]

Die Schwachstellen der heutigen eingesetzten Recyclingverfahren liegen in der unumgänglichen Verwendung von Membrantechnologien zur Reduktion des Salzgehaltes, beruhend auf Nanofiltration oder Umkehrosmose. Die eingesetzten Nanofiltrationen- oder Umkehrosmosemembranen entfernen oder reduzieren neben Salzen, wie beispielsweise Nitraten, Sulfaten, Härten sowie Schwermetallen, auch biologisch nicht abbaubare Substanzen anthropogenen oder biogenen Ursprungs. Allerdings verblocken die bisher kommerziell erhältlichen Membranen beim Einsatz von Abwasser infolge von Ablagerungen durch *Biofouling*. Diese Ablagerungen bestehen größtenteils aus extrazellulären polymeren Stoffen (EPS), die von Bakterien und anderen Mikroorganismen produziert werden und es ihnen ermöglicht, sich an der Oberfläche unter Bildung von mikrobiellen Agglomeraten zu fixieren. Die dadurch verursachte Verblockung der Membranporen tritt in Abhängigkeit von dem zu behandelnden Abwasser innerhalb kürzester Zeit auf und hat einen Anstieg des Druckes, eine Reduktion des Durchflusses und eine Verringerung der Trennleistung zur Folge. Außerdem wird zum Entgegenwirken eines Leistungsabfalls mehr Pumpleistung benötigt, womit ein hoher Energieverbrauch und damit ein Verlust der Energieeffizienz verbunden ist.^[2]

Erfahrungsgemäß kann ein Recyclingverfahren nur wirtschaftlich sein, wenn die eingestellten Drücke in der Regel während des Behandlungsprozesses nicht mehr als 50% ansteigen. Zeitgleich können bei Einhaltung dieser Grenzen die eingestellten Drücke in einem betriebssicheren Rahmen verbleiben, wodurch eine erhöhte Lebensdauer der Membranen und die Sicherheit der Anlage gewährleistet werden kann.^[2]

Während Antiscalant zum Schutz vor anorganischen Ablagerungen eingesetzt wird, stehen bis heute keine wirksamen Additive zur Verhinderung der Anreicherung von EPS auf der Membranoberfläche zur Verfügung. Zudem stehen für Nanofiltration- und Umkehrosmosemembranen¹ auch keine Reiniger zum Entfernen der EPS-Ablagerungen zur Verfügung, sodass die bisher erhältlichen Membranen nach einer vollständigen Verblockung ausgetauscht werden müssen.^[3]

Im Rahmen eines Forschungsprojektes der Universität Wuppertal konnten bereits M. Constapel et al. die Struktur sowie die physikalischen und chemischen Eigenschaften von EPS charakterisieren.^[4] Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wurde von der Firma GUM eine biofilmresistente Membran (BFR Membran) für die Nanofiltration entwickelt. Hierbei handelt es sich um eine oberflächenmodifizierte Membran mit einer veränderten Ladungseigenschaft der Oberfläche. Letzteres führt zu einer weniger starken Bindung des auch im neutralen pH Bereich schwach geladenen EPS, wodurch die Ablagerung wesentlich langsamer erfolgt. Durch die Modifizierung werden der Rückhalt und die Leistungsfähigkeit für die Membran nicht signifikant verändert.^[5]

Nach Pilot- und Technikumsversuchen wurden die entwickelten BFR Membranen innerhalb des Recyclingverfahren nach Dr. Füllung in der Firma Prinovis in Nürnberg, ehemals Maul-Belser, eingesetzt. Damit wurde das Abwasser auf Trinkwasserqualität gereinigt und im Kesselwasserbereich mit entsprechend hohen Anforderung an das Wasser eingesetzt. Die Firma Prinovis wurde circa zehn Jahren nach Inbetriebnahme der Recyclinganlage im Jahr 2022 geschlossen. Die Anlage wurde demontiert und im Technikum der Firma GUM mbH zum Zwecke der im Rahmen einer Studienarbeit festgelegten Untersuchungen durch die Universität Wuppertal wiederaufgebaut.^[3]

In diesem Zusammenhang sollten die BFR Membranen aus der Wasserrecyclinganlage nach einem ungefähr zehnjährigen Einsatz auf ihre Integrität und Leistungsfähigkeit überprüft werden. Ebenso sollte die vor der Schließung der Fa. Prinovis fällige Reinigung zum Entfernen der anorganischen Ablagerungen, wie Calciumcarbonat, Eisenhydroxid oder Bariumsulfat, nachgeholt und das Reinigungsverfahren optimiert werden.

2 Grundlagen

2.1 Recyclingverfahren Dr. Füllung

Das Recyclingverfahren Dr. Füllung, das bereits Anwendung in einer Druckerei in Nürnberg und in einem Hotel in Haiti gefunden hat, setzt für die Behandlung von Abwasser die Entwicklung einer dreistufigen Anlage mit den folgenden Modulen voraus:

1. Modul: Biologische Vorreinigung
2. Modul: Biologische Filtration
3. Modul: BFR Membranfiltration

Das Modul der biologischen Vorreinigung entspricht einer kommunalen Kläranlage mit mechanischer und biologischer Stufe, dimensioniert auf den nötigen Wasseranfall. Existiert bereits eine biologische Kläranlage, so kann dieses Wasser genutzt werden.^[6]

Die biologische Filtration besteht aus zwei Behältern, um die Reste von biologisch abbaubaren Stoffen, das heißt die Nährstoffe für Bakterien, zu eliminieren. So wird die Wiederverkeimung, d.h. die Neubildung von Bakterien, drastisch reduziert. Zusätzlich werden in dieser Filterkombination Partikel, Mikroorganismen, Eisen, Mangan, Ammonium und Nitrit entfernt. (Die für die Wiederverkeimung von Bakterien verbleibenden Nährstoffe werden über den assimilierbaren organischen Kohlenstoff (AOC) bestimmt. Dabei wird die Wiederverkeimung des Wassers bei 30°C und 72 h Bebrütungszeit erfasst). EPS kann durch die biologische Filtration nicht eliminiert werden und führt bei handelsüblichen Membranen zu den bereits beschriebenen Membranverblockungen.^[6]

Durch die Filtration mittels BFR Membranen werden Biofilmbildner und auch alle anderen organischen Inhaltsstoffe mit dem Konzentrat entfernt. Durch die spezielle Oberflächenbehandlung der BFR Membranen findet keine Verblockung durch EPS statt. Zusätzlich werden anorganische Inhaltsstoffe deutlich reduziert. Überschüssiges Natrium, Kalium, Chlorid und Nitrat werden zu ca. 50 % entfernt. Härtebildner wie Calcium, Magnesium als auch Sulfate werden zu ca. 90 % im Konzentrat zurückgehalten. Alle störenden Kationen und Anionen (z.B. Zink, Aluminium, Eisen, Mangan, Nickel, Chrom, Cadmium, Blei, Phosphat, Hexacyanoferrat, Arsenat usw. werden unter die Grenzwerte für Trinkwasser eliminiert. Die organischen Substanzen werden auf unter 1 mg/l reduziert (Erfahrungswerte 0,1 – 0,5 mg/l; gemessen als gelöster organischer Kohlenstoff (DOC)).^[6]

Mit Ausnahme des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts erfüllt das Wasser alle Anforderungen an die Trinkwasserverordnung. Zur Einstellung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts wird – wenn erwünscht – eine Filtration z.B. über Marmorkalk eingesetzt.

Wird das Wasser länger gespeichert oder sind sehr lange Leitungen mit geringem Durchfluss vorhanden, ist eine Schlusschlorung sinnvoll. Alternativ können auch eine UV- oder elektrochemische Desinfektion sowie eine Ozon- oder Wasserstoffperoxidbehandlung angewendet werden. Um Stagnation in Leitungen zu vermeiden, empfiehlt sich ein Kreislaufführung mit zwischengeschalteter Ultrafiltration.^[6]

Das Konzentrat kann erfahrungsgemäß unter Berücksichtigung einer einzuhaltenden Salzkonzentration von weniger als 2 g/l für die Pflanzenbewässerung eingesetzt werden. Bei Bedarf wird das Einhalten einer solchen Grenze durch erhöhte Konzentratentnahme erreicht, wobei das auszuwählende Konzentrat zu Permeatverhältnis von der Salzkonzentration des zu behandelnden Abwassers abhängig ist. Die Pflanzenbewässerung mit dem Konzentrat ermöglicht das erhaltene Wasser aus der Recyclinganlage vollständig zu nutzen.^[6]

2.2 Recyclinganlage Firma Prinovis in Nürnberg

Die bei der Firma Prinovis implementierte Anlage diente zur Behandlung von mit Toluol belastetem Abwasser. Dabei setzte sich die dreistufige Anlage wie folgt zusammen:

1. Kläranlage:
 - Kunststoffbehälter mit Füllkörper und Schrägklärer 1,5x1,5x3,0m (Fa. IUM)
 - Belüfter (Fa. Envicon)
 - Förderpumpe (Fa. Grundfos)
 - Kompressor (Fa. Becker)

2. Biofiltration:
 - Filterbehälter mit Filtersandfüllung 1,4mx1,4m (Fa. Aricon)
 - Vorlagebehälter für Rückspülwasser 1,3x2,8m (Fa. Aricon)
 - Pumpe zur Rückspülung (Fa. Grundfos)
 - Kunststoffbehälter mit Trichterboden 1,7mx3,5m (Fa. Avicon)
 - Kunststoffbehälter mit Aktivkohlefüllung 1,6mx1,4m (Fa. IUM)
 - Pumpe zur Rückspülung (Fa. Grundfos)

3. Membrananlage:
- Druckerhöhungspumpe CR 5 2,2 kW (Fa. Grundfos)
 - 2. Kreislaufpumpe CR 20 5,5 kW (Fa. Grundfos).
 - Vorlage 300 l PE-Behälter mit Ablauftrichter (Fa. Aricon)
 - Überfüllsicherung und Absperrhahn (Fa. Georg Fischer)
 - Druckrohre 8E300N.3 (Fa. Phoenix) für drei Membranen a 40 Zoll (1,016 m) Länge / 7,9 Zoll (201 mm) Durchmesser
 - 2x 3 BFR Membran 8 Zoll Membrandurchmesser / 40 Zoll Länge (Fa GUM)
 - Pneumatische 3-Wege Hähne (Fa. Frank)
 - 1000 l/h Schwebekörperdurchflussmesser Konzentrat (Fa. Frank)
 - elektronischer Durchflussmesser Permeat
 - 30000 l/h Schwebekörperdurchflussmesser Kreislauf (Fa. Frank)
 - Elektrisch betriebener Durchflussregler für Konzentrat
 - Siemens Steuerung
 - Dosieranlage für Säure (Fa. Grundfos Aldos 525402)
 - 250 l Vorratsgefäß für Säure (Fa. Aricon)
 - 10 bar Rohrfedermanometer Vor-und Nachmembran (Fa. Afriso)

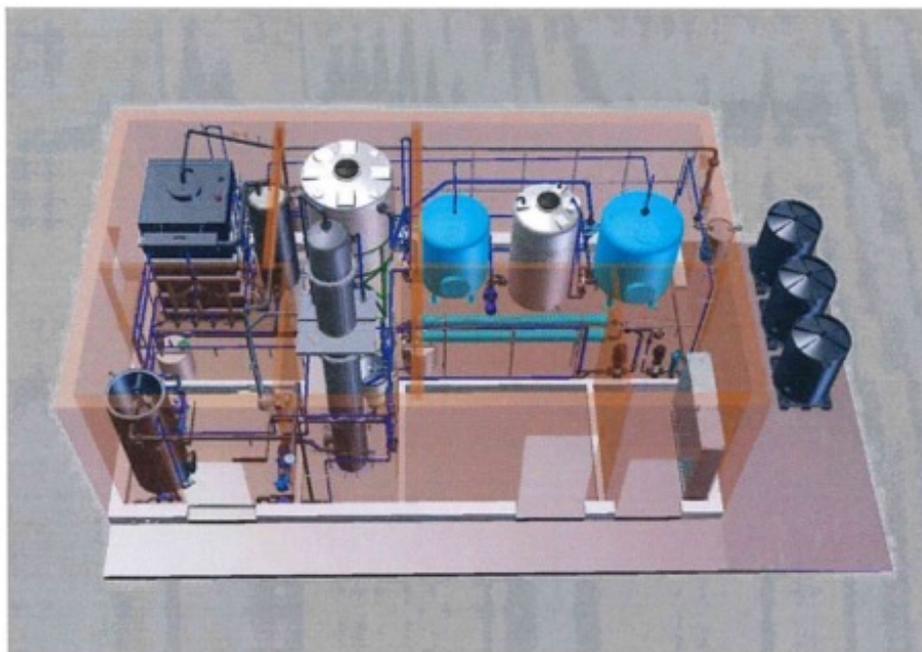


Abbildung 1

Von der Firma GUM aufgebaute Recyclinganlage in der Firma Prinovis in Nürnberg gemäß dem Recyclingverfahren Dr. Fülling.

Die Basis der BFR Membran sind die NF-90 Mebrane der Fa Dow. Die BFR Membranen werden hergestellt durch eine 60-minütige Behandlung unter Durchfluss mit einer Modifizierlösung bei einem Vordruck von 1,0 bar. Die Firma GUM konnte bereits durch frühere Untersuchungen zeigen, dass durch die Oberflächenbehandlung im Wesentlichen keine Änderung im Rückhalt bei gleichen Betriebsbedingungen erfolgte (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Untersuchung des Rückhaltes von anorganischen Stoffen vor und nach der Oberflächenmodifikation bei Verwendung von Leitungswasser.

		DOC	Leitf.	Natrium	Kalium	Calcium	Mg	Chlorid	Nitrat
		mg/l	mS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Feed	*	1,0	20,6	7,6	1,7	23	3,5	13	1,0
	**	1,0	22,3	10	1,8	23	3,6	16	1,0
Permeat	*	< 1,0	< 1,0	1,0	0,1	< 0,1	< 0,1	< 1,0	< 1,0
	**	< 1,0	1,9	1,0	0,2	< 0,1	< 0,1	< 1,0	1,0
Konzentrat	*	3,0	12	12	1,8	24	3,6	14	14,0
	**	2,0	14	14	2,4	33	4,9	22	19,0

*: vor Oberflächenmodifikation

**: nach Oberflächenmodifikation

2.3 Betrieb der Membrananlage Fa. Prinovis in Nürnberg

Die Steuerung der Membrananlage erfolgte über eine Siemens Steuerung. Die Temperatur, die Leitfähigkeit und der Druck wurden am Eingang der Membran überwacht und der Fluss des Kreislaufs, des Konzentratablasses und des Permeates verfolgt. Die Feed- und Konzentratflüsse wurden mithilfe von Schwebekörperdurchflussmessern bestimmt, während der Permeatfluss durch einen elektronischen Durchflussmesser erfasst wurde. Durch je einen Regler vor und hinter den Membranen konnte der Druck (Vormembran- und Nachmembrandruck) im System gesteuert werden. Zusätzlich konnte durch ein Membranhahn der Konzentratabfluss manuell eingestellt werden.

Die Membrananlage sollte ohne Antiscalant betrieben werden, da die als Antiscalant eingesetzten Polyacrylate nicht biologisch abbaubar sind und mit dem Konzentrat in die kommunale Kläranlage gelangen. Daher wurde zweimal wöchentlich automatisch mit Salzsäure gespült, um Ablagerungen von Calcium auf der Membranoberfläche zu lösen. Im Rahmen der Säurebehandlung und der anschließenden Spülung mit Leitungswasser konnte der pH-Wert über eine Elektrode kontrolliert werden.

Es konnte festgestellt werden, dass sich während des Betriebs auf den BFR Membranen weitere anorganische Ablagerungen absetzten. Dies ging mit einem Druckabfall und einer Reduktion des Durchflusses, d.h. mit einer Abnahme der Leistungsfähigkeit, einher. Das zu behandelnde Abwasser enthielt stark schwankende Eisengehalte zwischen 1 bis 10 mg/l. Dennoch lag nach der biologischen Stufe die Konzentration unterhalb des Trinkwassergrenzwertes. Jedoch entstanden aufgrund der hohen Abwassermengen innerhalb mehrerer Monate Eisenbeläge auf den Membranen und in den Leitungsrohren. Daher wurden die Membranen bei jeder Wartung (Intervall: 3 bis 6 Monaten) mit Ferril, einem speziell entwickelten Eisenreiniger, behandelt. Die Zudosierung erfolgte manuell durch das Abfüllen des Reinigers in das zuvor geleerte Vorratsgefäß der Säure. Damit konnten die Eisenverunreinigungen weitestgehend entfernt werden. Ferril ist bei der Firma NovaTech kommerziell erhältlich.

Nach 3 bis 4 Jahren konnten – trotz systematischer Reinigung – ungewöhnliche Leistungseinbußen im Druck und im Durchfluss festgestellt werden. Durch die Autopsie einer Membran und anschließender Untersuchung mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) konnte der auf der Membranoberfläche haftende Belag als Bariumsulfat identifiziert werden (siehe Abbildung 2).

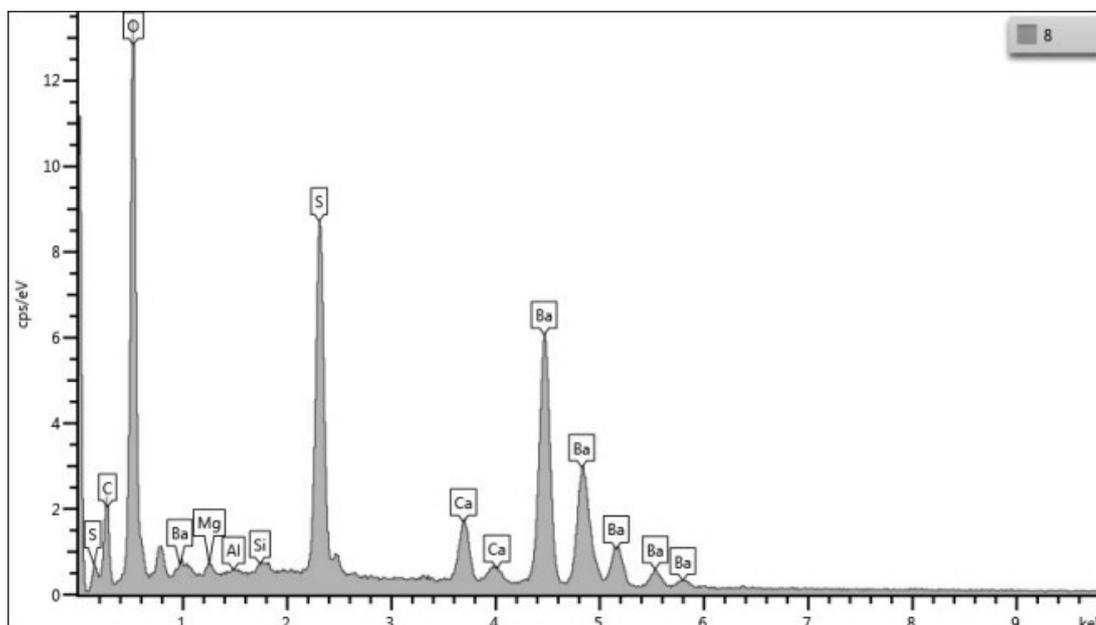


Abbildung 2

REM-EDX-Analyse der untersuchten BFR Membranoberfläche aus der Anlage der Fa. Prinovis.

Dementsprechend konnte erstmalig gezeigt werden, dass sich das in Spuren vorkommende Barium als Bariumsulfat auf der Membranoberfläche abgelagert hat. Zur Entfernung dieser Ablagerung wurde von der Firma GUM in Zusammenarbeit mit der Firma NovaTech der bariumlösende Reiniger Ba4 entwickelt. Die Behandlung der Membranen mit Ba4 führte zur nahezu vollständigen Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit. Dies wurde über das manuelle Abfüllen des Reinigers in das zuvor geleerte Vorratsgefäß der Säure und einem druckgetriebenen Durchfluss des Mediums durch die Membranen erreicht. Anzumerken ist, dass Ba4 sich zurzeit noch nicht im regulären Vertrieb befindet.

Die für das Jahr 2021 ausstehende Reinigung zur Bariumentfernung wurde nicht durchgeführt, da nach 8 Jahren feststand, dass die Firma Prinovis im Jahr 2022 ihren Betrieb einstellen würde. Ebenso wurden die vorgeschriebenen Behandlungen zur Kalk- und Eisenentfernung vor der Stilllegung der Anlage nicht ausgeführt.

Nach Wiederaufbau der Anlage im Technikum der Firma GUM sollte der Zustand der Membranen überprüft und die vorgenommenen Untersuchungen von der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführt werden.

3 Material und Methoden

3.1 Membrananlagen

Die in der Firma Prinovis eingesetzte Membrananlage wurde nach einem zehnjährigen Einsatz in Nürnberg demontiert und im Technikum der GUM mit folgenden Änderungen aufgebaut: Es wurde ein neues Gestell konstruiert. Ein Teil der geschweißten PE-Rohre wurde durch PVC-Rohre mit Klebeverbindungen ersetzt. Auf die Integration der Automatisierungstechnik wurde verzichtet. Der elektronische Durchflussmesser für das Permeat wurde durch ein 4000 l/h Schwebekörperdurchflussmesser der Firma Georg Fischer ausgetauscht. Die pneumatischen Antriebe für die 2- und 3-Wege-Hähne wurden demontiert und auf Handbetrieb umgestellt (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3

Membrananlage im Technikum der Fa. GUM mit BFR Membranen zum Wasserrecycling.

Zudem wurde die Säuredosierung nicht mehr automatisch gesteuert. Die Zugabe der Reinigungschemikalien erfolgte manuell durch das Abfüllen des Reinigers in die offene Vorlage. Das Permeat und Konzentrat wurde nicht wie gewohnt abgeleitet, sondern im offenem Vorlagebehälter gesammelt und über die Druckerhöhungspumpe der Anlage erneut zugeführt. Für ein besseres Verständnis wird die aufgebaute Membrananlage als Fließschema in Abbildung 24 dargestellt (siehe Anlage 3).

Neben dem Wiederaufbau der in der Firma Prinovis eingesetzten Membrananlage wurde eine Testanlage für einzelne Membranen errichtet, damit zunächst die Überprüfung und Optimierung des entwickelten Reinigungskonzeptes an einer einzelnen Membran erfolgen konnte. In diesem Zusammenhang wird im nachfolgendem die Testanlage für einzelne Membranen als Prüfanlage definiert. Die Prüfanlage wird in Form eines Fließschemas in Abbildung 25 dargestellt (Siehe Anlage 3).

- Prüfanlage:
- Pumpenstand CNR2 (Grundfos)
 - Vorlage 150 l PE-Behälter (Fa. Aricon)
 - Druckrohr (Fa. Phönix) für eine Membran a 40 Zoll (1,016 m) Länge, 7,9 Zoll (201 mm) Durchmesser
 - BFR Membran 8 Zoll Durchmesser und 1,0 m Länge (Fa GUM)
 - 1000 l/h Schwebekörperdurchflussmesser Feed (Fa. Georg Fischer)
 - 1000 l/h Schwebekörperdurchflussmesser Permeat (Fa. Georg Fischer)
 - 10 bar Rohrfedermanometer vor und nach der Membran (Fa. Afriso)
 - Membranregler (Fa. Georg Fischer)

Bei der Prüfanlage wurde der Gesamtfluss (Feed) Q_F vor der Membran gemessen. Der Konzentratfluss Q_K ergibt sich aus der Subtraktion des Permeatflusses Q_P von dem Feedfluss Q_F . Die Differenz wird im Folgendem mit Rücklauf bezeichnet. Der Vormembrandruck p_0 und der Nachmembrandruck p_1 wurden jeweils mit einem entsprechenden Manometer bestimmt. Der Nachmembrandruck p_1 durch einen Regler eingestellt. Das Permeat und das Konzentrat wurden drucklos in der Vorlage gesammelt und wieder in die Membran gefördert. Durch die hohe Leistung der Pumpe konnte ein Verhältnis von Feed zu Permeat größer drei erreicht werden, sodass keine Kreislaufpumpe zugeschaltet werden musste. Das Totvolumen der Anlage beträgt nach volumetrischer Bestimmung 29 Liter. Dabei entfallen ungefähr 23 Liter auf das Druckrohr mit Membran.

Die BFR Membranen, welche ursprünglich im ersten Druckrohr der Membrananlage der Firma Prinovis eingesetzt wurden, wurden ausgebaut und in die Prüfanlage montiert. Die hierbei behandelten Membranen werden im nachfolgendem als Membran D, E und F bezeichnet. Hingegen wurden die im zweiten Druckrohr der Membrananlage der Firma Prinovis eingesetzten BFR Membranen als obere Straße in der aufgebauten Membrananlage installiert und im Nachfolgendem als Membran A, B und C gekennzeichnet.

3.2 Analytische Methoden

Die Eisenbestimmung erfolgte in dem Eisenreiniger photometrisch analog DIN 38406 Teil I. Dabei wurde zur Reduktion von Fe(III)-Ionen zu Fe(II)-Ionen Hydroxylammoniumchlorid in Anwesenheit eines Ammoniumacetatpuffers (pH-Wert von ca. 3,5) eingesetzt und das Lösungsgemisch mit 1,10-Phenanthroliniumchlorid versetzt.

Letzteres bildet mit Fe(II)-Ionen einen rot-orangen beständigen Farbkomplex, welcher nach 15 min bei 510 nm im Photometer mit einer 1-cm-Küvette gemessen wurde.

Die Bestimmung von Calcium und Eisen in Ba4 erfolgte mittels ICP-OES nach DIN EN ISO 11885:2009-09 durch das Labor Dr. Füllung GmbH & Co KG.

Die Bestimmung des Bariums im alkalischen Reiniger konnte nicht mittels ICP-OES durchgeführt werden, da im Rahmen der Probenvorbereitung das Barium als Bariumsulfat ausfiel. Aufgrund dessen erfolgte die Quantifizierung des Bariums im alkalischen Reiniger gravimetrisch als Bariumsulfat. Dazu wurden die Proben mit Schwefelsäure bis zum Erreichen eines pH-Wertes von 5 versetzt und die Vollständigkeit der Fällung durch Zugabe von Natriumsulfatlösung kontrolliert. Daraufhin wurde das schwerlösliche Bariumsulfat mittels Zentrifugation isoliert, mit einer mit bariumsulfatgesättigter wässrigen Lösung gewaschen und vor der Auswaage bei 105°C getrocknet. Zudem wurde der gravimetrisch bestimmte Niederschlag mittels Röntgenfluoreszenzanalyse durch die Fa. Soepenberg Hünxe auf Reinheit überprüft.

Die pH- und Leitfähigkeitsmessungen erfolgten mit dem Gerät WTW Multi 340i.

3.3 Materialien

Die folgenden Chemikalien wurden ohne weitere Aufbereitung mit den von den Lieferanten angegebenen Reinheiten verwendet: Ammoniumeisen(II)-sulfat (Fa. Merck, p.a.), Salzsäure (Fa. Roth p.a.), Hydroxylammoniumchlorid (Fa Merck, p.a.), 1,10-Phenanthroliniumchlorid (Fa. Roth, p.a.), Ammoniumacetat (Fa Roth, p.a.), Essigsäure 100% (Fa. Roth p.a.), Schwefelsäure (Fa. Roth, p.a.), Natriumsulfat (Fa. Roth, Ph. Eur.), Bariumsulfat (eigene Herstellung).

Die folgenden Reiniger wurden kommerziell erworben und ohne weitere Veränderungen eingesetzt: Ba4 zur Bariumreinigung (Entwicklungsrezeptur, Fa. NovaTech), Ferril zur Eisenreinigung (Fa. NovaTech), saurer Membranreiniger NovaTech Cleaner 420S zur Kalkreinigung (Fa. NovaTech) und technisches HCl (Fa. NovaTech).

4 Ergebnis und Diskussion

4.1 Prüfanlage

Die einzelnen BFR Membranen D, E und F dienten einerseits zur Untersuchung der Auswirkungen des Recyclingverfahrens auf die Membranpermeabilität und andererseits zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit der Reiniger zum Entfernen der entsprechenden Ablagerungen. Im Rahmen eines Reinigungsvorganges und bei den entsprechenden Untersuchungen mit Leitungswasser wurden Messdaten zum Feed-, Konzentrat- und Permeatfluss bei entsprechenden Vor- und Nachmembrandruck gesammelt, sowie pH- und Leitfähigkeitsmessungen im Feed/Vorlage, Konzentrat und Permeat durchgeführt. Die dabei gewonnen Messwerte sind tabellarisch in Anlage 1 vorzufinden (siehe Anlage 1, Tabelle 20 – 31).

1. Membran D:

Die Membran D wurde von der Firma GUM solange mit Salzsäure, Ferril und Ba4 gereinigt, bis keine Leistungssteigerung mehr festgestellt werden konnte. Nach der Entfernung der Kalk-, Eisen- und Bariumablagerungen wurde eine Erhöhung der Permeatleistung um 230% erzielt.

Membran vor Reinigung 160 l/h (bei $T = 20^{\circ}\text{C}$ und $p_0 = 3,0 \text{ bar} / p_1 = 2,6 \text{ bar}$)

Membran nach Reinigung 520 l/h (bei $T = 20^{\circ}\text{C}$ und $p_0 = 3,0 \text{ bar} / p_1 = 2,6 \text{ bar}$)

2. Membran E:

Die durchgeführte Reinigung bei der Membran E umfasste eine einmalige Spülung mit dem sauren Reiniger, eine dreimalige Spülung mit Ferril, eine sechsmalige Spülung mit Ba4 und eine abschließende weitere Eisenreinigung. Insgesamt konnte eine Leistungssteigerung der Permeabilität um 222% erzielt werden.

Membran vor Reinigung 155 l/h (bei $T = 20^{\circ}\text{C}$ und $p_0 = 3,0 \text{ bar} / p_1 = 2,6 \text{ bar}$)

Membran nach Reinigung 500 l/h (bei $T = 20^{\circ}\text{C}$ und $p_0 = 3,0 \text{ bar} / p_1 = 2,6 \text{ bar}$)

Zur Beurteilung der Auswirkung eines Reinigungszyklus auf die Permeatleistung wurde nach der Verwendung eines jeweiligen Reinigers zunächst ein Spülvorgang mit Leitungswasser durchgeführt. Hierbei wurde das Permeat und Konzentrat abgeführt und die Anlage solange mit Leitungswasser gespült, bis mittels einer Leitfähigkeitsmessung keine signifikanten Mengen an Reiniger nachgewiesen werden konnten. Daraufhin wurde die Prüfanlage erneut mit Leitungswasser befüllt und der Permeatfluss bei einer Temperatur T von 20°C , einen Vormembrandruck p_0 von 3,0 bar und einen Nachmembrandruck p_1 von 2,6 bar gemessen (siehe Abbildung 4).

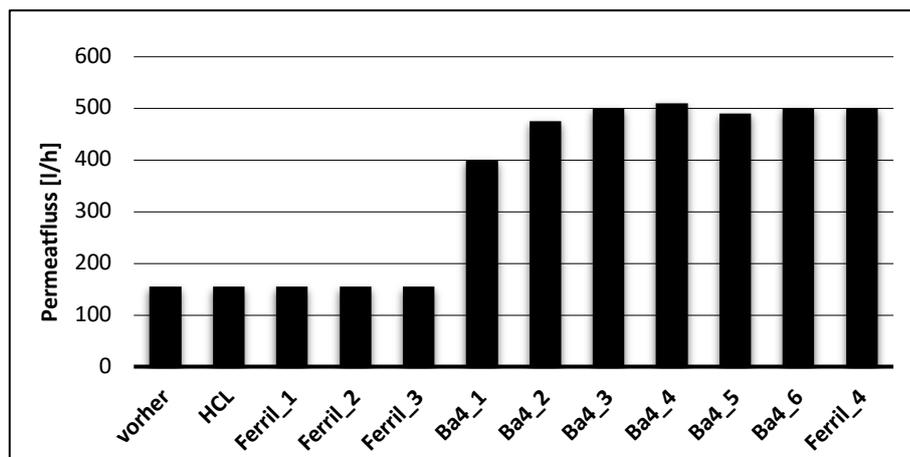


Abbildung 4

Untersuchung der Permeatleistung mit Leitungswasser nach einem jeweiligen Reinigungsvorgang (Membran E). Die Zahl nach dem Unterstrich entspricht der Anzahl des durchgeführten Reinigungszyklus.

In Abbildung 4 ist zu erkennen, dass die Behandlungen mit dem sauren Reiniger und Ferril zu keiner Veränderung der Permeabilität führten. Erst durch die Anwendung von Ba4 zum Entfernen von Bariumsulfat ist eine Verbesserung der Permeatleistung eingetreten. Daher ist anzunehmen, dass hauptsächlich Bariumsulfat zu einem Verlust der Leistungsfähigkeit der Membrananlage beiträgt. Bereits nach dem ersten Spülgang mit Ba4 wurde eine Zunahme des Permeatflusses von 160% erreicht. Der zweite und dritte Spülvorgang mit Ba4 führten im Vergleich zum vorherigen Reinigungszyklus nur zu einer weiteren Erhöhung der Permeabilität von 18% und 5%. Nach der vierten Bariumreinigung führten auch weitere Reinigungsvorgänge nicht zu einer Verbesserung der Permeabilität, sodass ein entsprechendes Maximum erreicht wurde.

Im Rahmen der Bariumreinigung wurden bei jedem Reinigungszyklus dieselben Bedingungen angewendet. Diese umfassen das Lösen von 2 Liter des Bariumreinigers in

einem System mit 123 Liter Leitungswasser und das Einstellen eines Vormembrandruckes p_0 von 3,0 bar.

Bei jeder Behandlung wurde jeweils eine Probe aus dem Rücklauf 1 Stunde, 3 Stunden und zwischen 20 bis 24 Stunden nach Reinigungsbeginn entnommen und die Bariumsulfatkonzentration gravimetrisch bestimmt (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Konzentration von Bariumsulfat im Rücklauf bei einem Reinigungsvorgang in Abhängigkeit von der Zeit (Membran E).

Bariumsulfat [g/l]			Bariumsulfat [g/l]		
Ba4_1:	1 h	1,61	Ba4_4:	1 h	0,76
	3 h	1,82		3 h	0,99
	20 h	2,31		20 h	1,32
Ba4_2:	1 h	2,12	Ba4_5:	1 h	0,12
	3 h	2,39		3 h	0,18
	20 h	2,81		20 h	0,39
Ba4_3:	1 h	1,11	Ba4_6:	1 h	0,02
	3 h	1,60		3 h	0,04
	20 h	2,22		20 h	0,21

Es konnte festgestellt werden, dass die Bariumsulfatkonzentration im Konzentrat beim ersten Reinigungszyklus (Ba4_1) geringer als beim zweiten Reinigungszyklus (Ba4_2) ist. Daher bestand Grund zu der Annahme, dass sich während Ba4_1 noch Calcium in Form von Kalk in der Membran befand und die Reinigungswirkung von Ba4 zur Bariumsulfatentfernung beeinträchtigt wurde. Dies konnte durch die durchgeführte ICP-OES Messung bestätigt werden: Bei Ba4_1 lag nach 20 Stunden eine Calciumkonzentration von 0,36 g/l vor. Hingegen enthielten die Proben der darauffolgenden Reinigungszyklen jeweils Calciumkonzentrationen zwischen 0,10 und 0,11 g/l.

Wird die ermittelte Konzentration an Bariumsulfat im Rücklauf auf das gesamte eingesetzte Volumen an Leitungswasser in der Membrananlage bezogen, so lässt sich **näherungsweise** die Menge des von der Membranoberfläche entfernten Bariumsulfats ermitteln (siehe Abbildung 5). Hierbei entspricht die angegebene Menge an Bariumsulfat bei einem Spülvorgang der Summe aus entferntem Bariumsulfat innerhalb eines Reinigungszyklus mit der entfernten Menge durch vorherige Behandlung/-en.

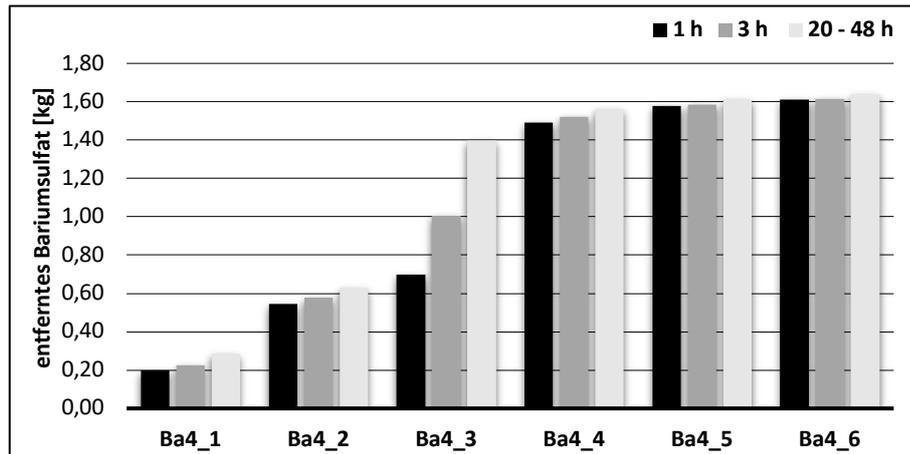


Abbildung 5

Die näherungsweise entfernte Menge an Bariumsulfat (kumuliert) von der Membranoberfläche (Membran E).

Abbildung 5 verdeutlicht, dass durch die ersten vier Reinigungszyklen mit Ba4 zunehmende Mengen an Bariumsulfat von der Membranoberfläche abgetragen wurden. Dies spiegelt sich auch in der Permeatleistung wider, da nach den Spülvorgängen Ba4_1 bis Ba4_4 der Permeatfluss stieg und die Membran größtenteils von störendem Barium befreit wurde. Mithilfe der zusätzlich durchgeführten Spülvorgängen Ba4_5 und Ba4_6 konnte (in Bezug auf Ba4_4) noch ungefähr 0,9% bis 4,7% weiteres Bariumsulfat entfernt werden. Der dabei verbundene Einfluss auf die Permeabilität konnte nicht festgestellt werden, sodass die Möglichkeit besteht, mit weniger Reinigungsschritten auszukommen.

In Abbildung 6 wird die untersuchte Bariumsulfatkonzentration im Rücklauf in Abhängigkeit von der Behandlungsdauer dargestellt.

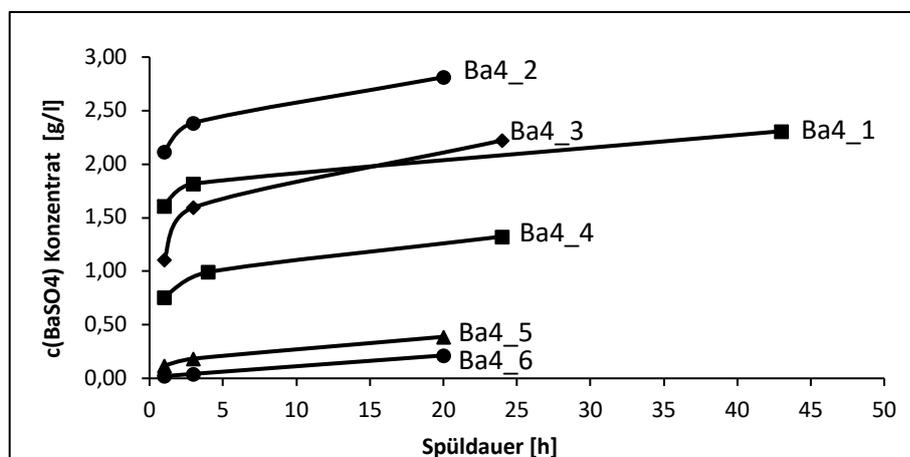


Abbildung 6

Untersuchung der Bariumsulfatkonzentration im Rücklauf in Abhängigkeit von der Zeit bei einem jeweiligen Reinigungszyklus mit Ba4 (Membran E).

Mit zunehmender Reinigungsdauer steigt innerhalb eines Reinigungszyklus die Konzentration von Barium im Rücklauf an. Dementsprechend wird immer mehr abgelagertes Bariumsulfat von der Membranoberfläche gelöst. Dieser Effekt ist innerhalb der ersten 3 Stunden im Vergleich zum Zeitraum zwischen 3 und 24 Stunden deutlich stärker ausgeprägt. Daher besteht zu Zeit- und Energieeinsparungen die Möglichkeit, die Behandlungsdauer zu verkürzen.

Zusätzlich wurde nach der Reinigung die Permeatleistung bereits in der Prüfanlage bei einem Temperaturbereich von 14°C bis 25°C, einen Vormembrandruck p_0 von 3,0 bar und einen Nachmembrandruck p_1 von 2,6 bar untersucht (siehe Abbildung 7).

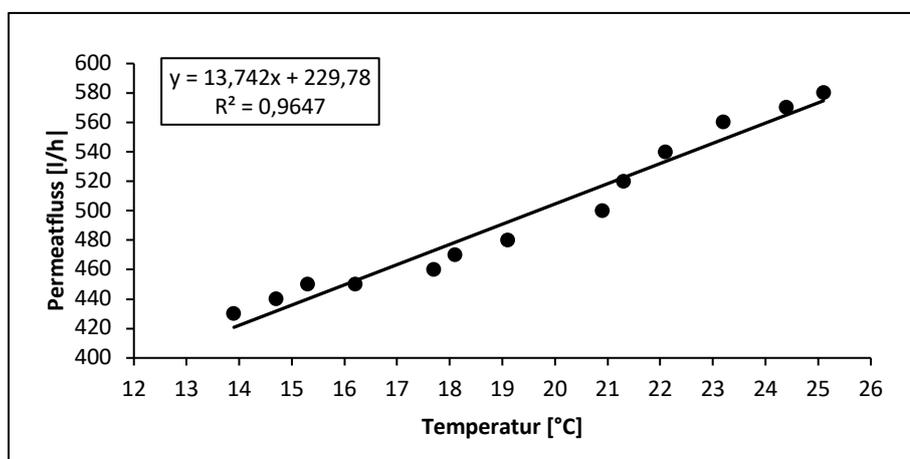


Abbildung 7

Untersuchung der Permeatleistung von Membran E mit Leitungswasser nach beendeter Reinigung bei einem Vormembrandruck von 3,0 bar und Nachmembrandruck von 2,6 bar.

Nach dem Ausbau der Membran E ließ sich die Wirkung der durchgeführten Säure-, Eisen- und Bariumbehandlung auch optisch erfassen (siehe Abbildung 8).

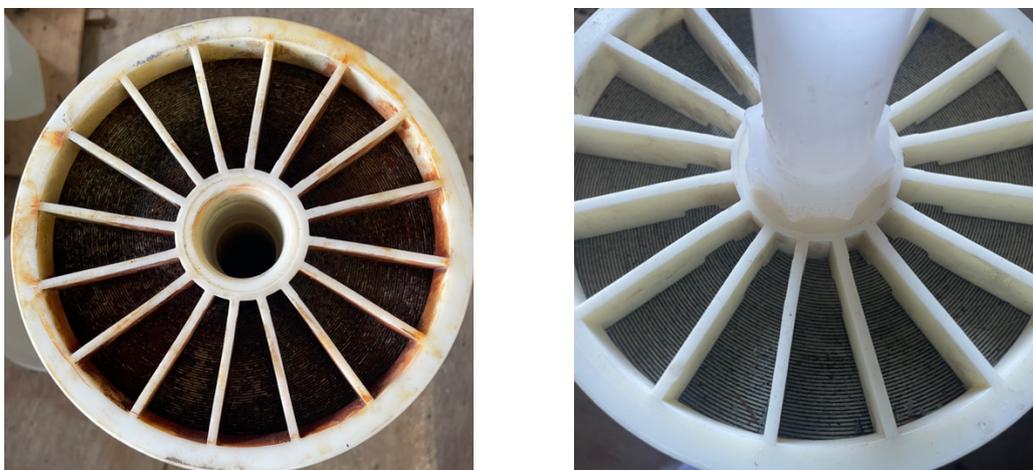


Abbildung 8

Optischer Vergleich der Membran E vor der Reinigung (links) und nach der Reinigung (rechts).

3. Membran F

Die Reinigung von Membran F umfasste eine fünfmalige Spülung mit Ba4 und eine abschließende Spülung mit Ferril. Im Vergleich zur Membran E wurde auf eine Spülung mit dem sauren Reiniger verzichtet. Da festgestellt wurde, dass durch Ba4 ebenfalls Kalkablagerungen gelöst werden (vergleiche Calciumkonzentration nach Ba4_1 und Ba4_2 bei Membran E). Zudem wurde zuerst die Bariumreinigung durchgeführt, damit die Auswirkungen der Eisenreinigung auf die Permeatleistung genauer untersucht werden konnten. Die durchgeführten Reinigungszyklen mit Ba4 wurden unter denselben Bedingungen wie bei Membran E ausgeführt. Mit den angewendeten Reinigungsverfahren konnte insgesamt eine Leistungssteigerung der Permeabilität um 205% erzielt werden.

Membran vor Reinigung 180 l/h (bei $T = 20^{\circ}\text{C}$ und $p_0 = 3,0 \text{ bar} / p_1 = 2,6 \text{ bar}$)

Membran nach Reinigung 550 l/h (bei $T = 20^{\circ}\text{C}$ und $p_0 = 3,0 \text{ bar} / p_1 = 2,6 \text{ bar}$)

Analog zu Membran E wurde zur Beurteilung der Auswirkung eines Reinigungszyklus auf die Permeatleistung nach der Verwendung eines jeweiligen Reinigers ein Spülvorgang mit Leitungswasser durchgeführt, bis mittels einer Leitfähigkeitsmessung am abgeführten Permeat und Konzentrat keine signifikanten Mengen an Reiniger nachgewiesen werden konnten. Es folgte die Messung des Permeatflusses bei einer Temperatur T von 20°C , einen Vormembrandruck p_0 von 3,0 bar und einen Nachmembrandruck p_1 von 2,6 bar (siehe Abbildung 9).

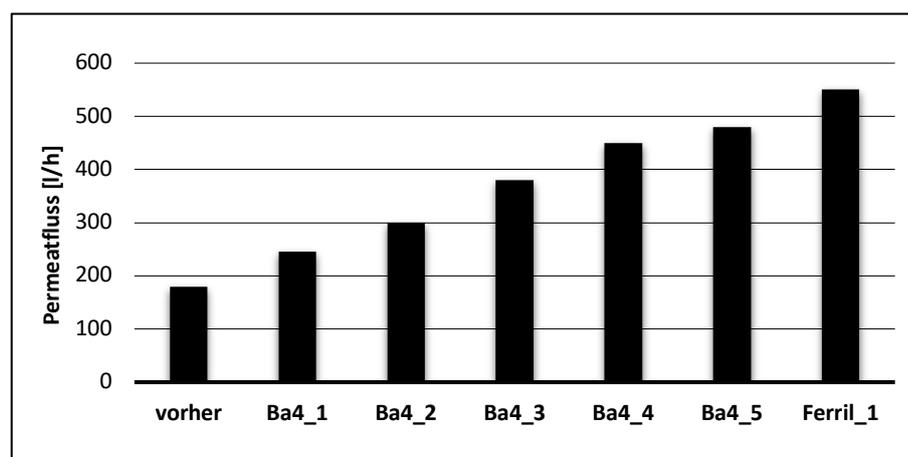


Abbildung 9

Untersuchung der Permeatleistung mit Leitungswasser nach einem jeweiligen Reinigungsvorgang (Membran F). Die Zahl nach dem Unterstrich entspricht der Anzahl des durchgeführten Reinigungszyklus.

Auch ohne vorherige Säure- und Eisenreinigung fand durch die Behandlung mit Ba4 eine Zunahme der Permeabilität statt. Jedoch fällt die Steigerung der Permeatleistung nach einem Reinigungszyklus mit Ba4 im Vergleich zu Membran E geringer aus. Dies trifft vor allem bei dem ersten Spülgang mit Ba4 zu. Bei Membran E wurde eine Leistungssteigerung von 160% erreicht und bei Membran F eine Leistungssteigerung von lediglich 36%. Dies könnte auf die vorhandene Kalkablagerung aufgrund der fehlenden Salzsäurereinigung zurückzuführen sein. Bereits bei der Bariumreinigung der Membran E fand durch ein größeren Calciumgehalt eine Abnahme der Reinigungsleistung von Ba4 zur Bariumentfernung statt.

Dies veranlasste im Rahmen der Bariumreinigung bei Membran F jeweils eine Probe aus dem Rücklauf bei 1 Stunde, 3 Stunden, 7 Stunden und 20 bis 23 Stunden nach Reinigungsbeginn zu entnehmen und neben Barium auch Calcium zu bestimmen. Zusätzlich wurde bei einigen Proben auch die Eisenkonzentration untersucht (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Konzentration von Bariumsulfat, Calcium und Eisen im Rücklauf bei den jeweiligen Bariumreinigungen in Abhängigkeit von der Zeit.

		Bariumsulfat [g/l]	Calcium [g/l]	Eisen [g/l]
Ba4_1:	1 h	0,50	0,65	0,05
	3 h	0,34	-	-
	7 h	0,24	-	-
	23 h	0,04	0,80	0,02
Ba4_2:	1 h	0,81	0,55	0,02
	3 h	0,70	-	-
	7 h	0,60	-	-
	20 h	0,40	0,75	< 0,01
Ba4_3:	1 h	0,99	-	-
	3 h	1,16	-	-
	7 h	1,06	-	-
	20 h	0,81	0,75	< 0,01
Ba4_4:	1 h	0,90	-	-
	3 h	1,19	-	-
	7 h	1,27	-	-
	20 h	1,44	0,60	0,02
Ba4_5:	1 h	0,62	0,11	0,01
	3 h	0,91	-	-
	7 h	1,14	-	-
	20 h	1,23	0,33	0,05

Es ist zu erkennen, dass trotz derselben Reinigungsbedingungen mit Ba4 bei Membran F im Rahmen der ersten Reinigung weniger Bariumsulfat von der Membranoberfläche abgetragen wurde als bei Membran E. Die geringere Reinigungswirkung von Ba4 bei Membran F kann auf die fehlende Salzsäurereinigung und der damit verbundene höhere Calciumgehalt auf der Membranoberfläche, sowie auf die Fähigkeit von Ba4 bevorzugt Calcium zu entfernen, zurückgeführt werden. Letzteres kann durch einen Vergleich der analysierten Proben bei Ba4_1 bestätigt werden (Membran F bei Ba4_1 nach 1 h 0,50 g/l Bariumsulfat und 0,65 g/l Calcium im Rücklauf und Membran E bei Ba4_1 nach 1 h 1,60 g/l Bariumsulfat und 0,36 g/l Calcium im Rücklauf). Der Vergleich ist unter der Annahme erfolgt, dass die Ablagerungen auf beiden Membranoberflächen ähnlich waren. Dadurch resultiert auch, dass durch die kleinere Menge an abgetragenen Bariumsulfat die anfängliche Leistungssteigerung geringer aus.

Auffällig ist, dass mit zunehmender Behandlungsdauer bei den ersten drei Reinigungszyklen die Konzentration an Bariumsulfat im Rücklauf abnimmt (siehe Abbildung 10).

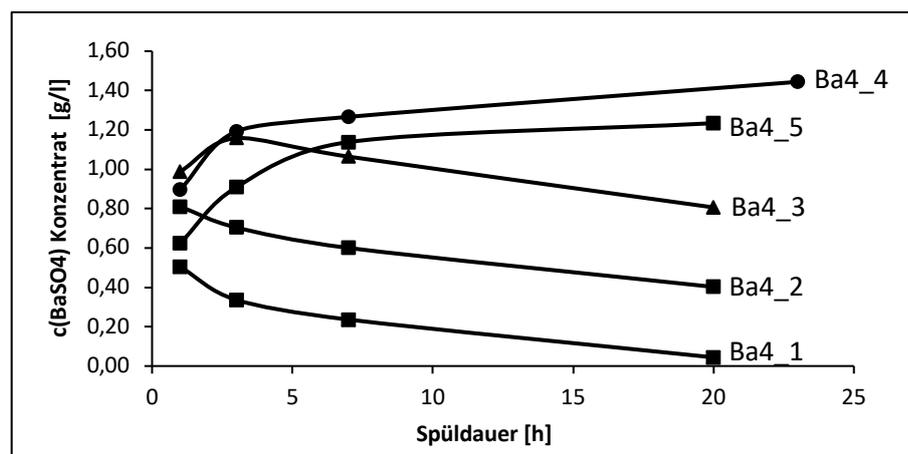


Abbildung 10

Untersuchung der Bariumsulfatkonzentration im Rücklauf in Abhängigkeit von der Zeit bei einem jeweiligen Reinigungszyklus mit Ba4 (Membran F).

Entgegen den zuvor gewonnenen Erkenntnisse unterliegt die ermittelte Konzentration an Bariumsulfat im Rücklauf bei Ba4_1 und Ba4_2 in Abhängigkeit der Behandlungsdauer einer hyperbolisch fallenden Funktion. Dies impliziert, dass sich im Rahmen der Behandlung bereits gelöstes Bariumsulfat erneut auf die Membranoberfläche absetzt. Grund dafür ist, dass Ba4 mit zunehmender Behandlungsdauer (und Betriebstemperatur) bevorzugt mit Calcium reagiert und die Reinigungswirkung zur Bariumentfernung nahezu verloren geht. Daher nimmt mit der Zeit die Konzentration an Calcium bei den betrachteten Reinigungszyklen zu (vergleiche Tabelle 2).

Erst ab dem vierten Reinigungszyklus ist die zuvor ermittelte Gesetzmäßigkeit, dass mit zunehmender Reinigungsdauer die Konzentration an Bariumsulfat innerhalb eines Reinigungszyklus im Rücklauf ansteigt, erneut gegeben. Hier liegt auch die Konzentration an Calcium erneut auf Leitungswasserniveau, weswegen davon ausgegangen werden kann, dass die Membran nahezu von Calcium mit Ba4 befreit wurde, sodass die Reinigungswirkung von Ba4 nicht weiter beeinträchtigt wurde.

Die im Anschluss durchgeführte Eisenreinigung realisierte bei Membran F eine weitere Steigerung des Permeatflusses. Für die Eisenreinigung wurden 2 kg Ferril in einem System mit 123 l Leitungswasser gelöst und ein Vormembrandruck von 3,0 bar eingestellt. Es erfolgte eine quantitative Bestimmung von Eisen bei den entnommenen Proben aus dem Rücklauf bei 1 Stunde, 3 Stunden und 20 Stunden nach Reinigungsbeginn (siehe Tabelle 4 und Abbildung 11).

Tabelle 4: Konzentration von Eisen im Rücklauf der Eisenspülung in Abhängigkeit von der Zeit.

		Eisenkonzentration im Rücklauf [g/l]	Entferntes Eisen von Membranoberfläche [g]
Ferril_1:	1 h	1,34	164
	3 h	1,91	234
	20 h	2,03	249

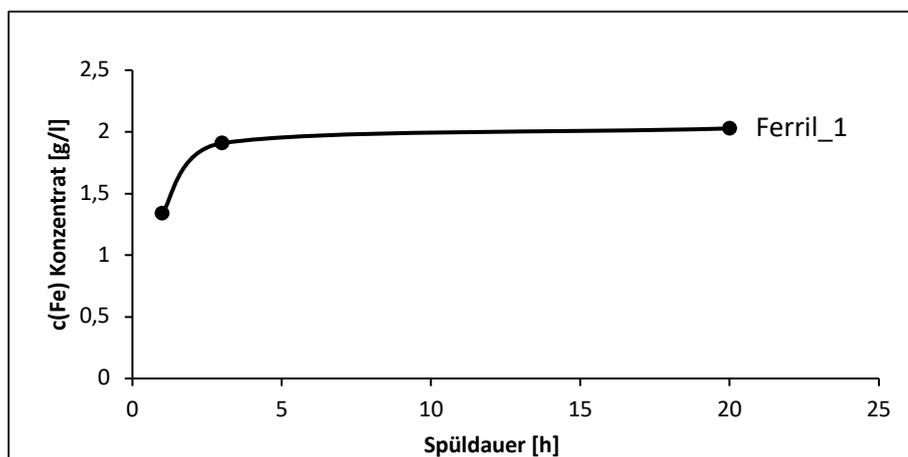


Abbildung 11

Untersuchung der Eisenkonzentration im Rücklauf in Abhängigkeit von der Zeit (Membran F).

Da mit zunehmender Reinigungsdauer die Konzentration an Eisen steigt, wird dementsprechend immer mehr Eisen von der Membranoberfläche gelöst. Innerhalb von 3

Stunden wird bei einem Reinigungszyklus das meiste Eisen gelöst. Nach 20 Stunden wurde der Ertrag der Eisenentfernung lediglich um weitere 6% im Vergleich zu einer Spüldauer von 3 Stunden erhöht. Daher kann die Reinigungsdauer bei der Eisenentfernung mit Ferril auf 3 Stunden beschränkt werden.

Nach der durchgeführten Reinigung wurde die Permeatleistung in einem Temperaturbereich von 15°C bis 22°C, einen Vormembrandruck p_0 von 3,0 bar und einen Nachmembrandruck p_1 von 2,6 bar untersucht (siehe Abbildung 12).

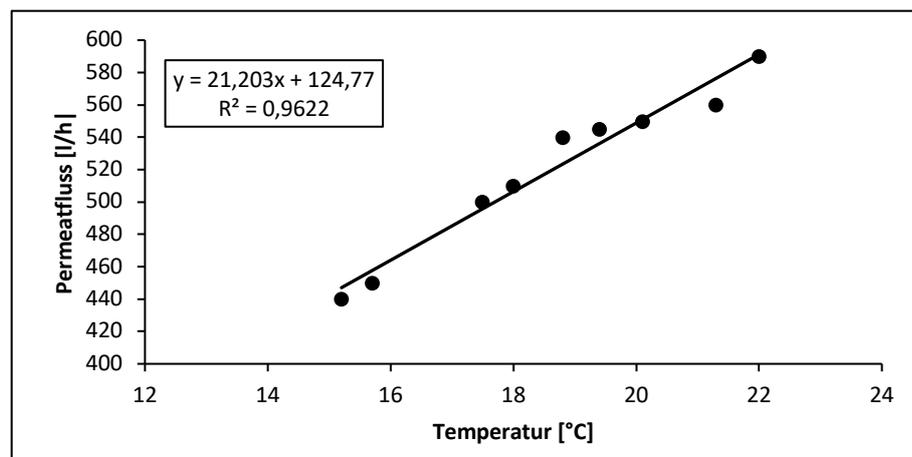


Abbildung 12

Untersuchung der Permeatleistung von Membran F mit Leitungswasser nach beendeter Reinigung bei einem Vormembrandruck von 3,0 bar und Nachmembrandruck von 2,6 bar.

Die Wirkung der durchgeführten Reinigung bei Membran F ließ sich ebenso optisch erfassen (siehe Abbildung 13).



Abbildung 13

Optischer Vergleich der Membran vor der Reinigung (links) und nach der Reinigung (rechts).

4.2 Technikumsanlage

Das aus der damaligen Membrananlage entnommene Membranrohr mit den BFR Membranen A, B und C wurde als obere Straße in die Technikumsanlage der Fa GUM eingebaut. Dabei wurden die aus der Prüfanlage gewonnenen Erkenntnissen zur Reinigung der Membranen genutzt. Über dasselbe Druckrohr folgte die Bestimmung der Permeatleistung bei verschiedenen Temperaturen und Drücken. Ferner wurden die in der Prüfanlage bereits gereinigten Membranen D, E und F in das zweite Druckrohr eingesetzt und über die untere Straße die Permeatleistung bestimmt. Im Rahmen eines Reinigungsvorganges oder bei den entsprechenden Untersuchungen der Permeatleistung wurden der Feed-, Konzentrat- und Permeatfluss bei entsprechendem Vor- und Nachmembrandruck erfasst, sowie pH- und Leitfähigkeitsmessungen bei Feed, Konzentrat und Permeat durchgeführt. Die dabei gewonnen Messwerte sind tabellarisch in Anlage 2 vorzufinden (siehe Anlage 2, Tabelle 31 – 45).

1. Säurereinigung bei Membran A, B und C

Zur Entfernung der Kalkablagerungen wurden 500 ml HCl (30 Gew.%) in den Vorlagebehälter mit 150 Liter Leitungswasser versetzt und ein Vormembrandruck p_0 von 6,0 bar eingestellt. Die Säurereinigung wurde über die Messung des pH-Wertes im Vorlagebehälter überwacht und bis zur Erschöpfung der Säure durchgeführt (siehe Abbildung 14).

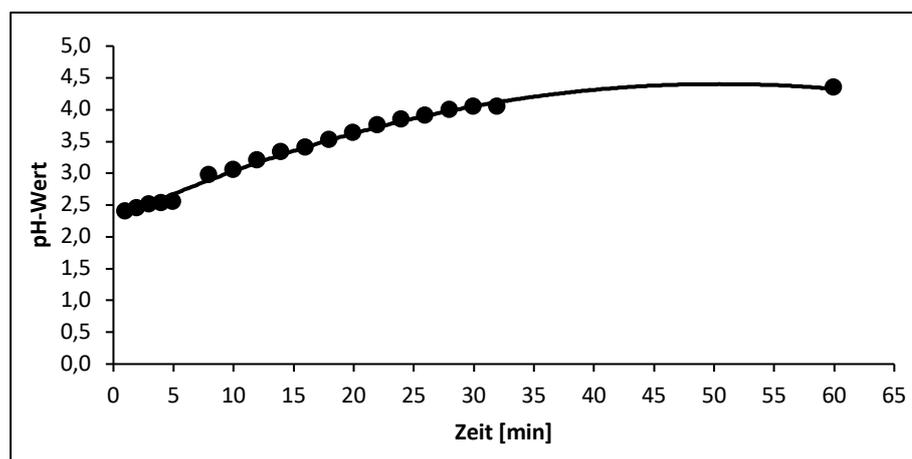


Abbildung 14

Überwachung der Säurereinigung (HCl) über die Messung des pH-Wertes im Vorlagebehälter (Membran A, B, und C).

Durch das Lösen von Kalk und der einhergehenden Bildung von Hydrogencarbonat steigt der pH-Wert der Reinigungslösung an. Bereits nach 30 min hat sich ein pH-Wert von 4,04 eingestellt, während die Säurekapazität (4,3 pH-Wert) nach 60 min erreicht

wurde. Daraufhin erfolgte wiederholt die Zugabe einer weiteren HCl-Lösung. Insgesamt wurden 13,34 mol HCl im Rahmen der Säurebehandlung verwendet.

2. Eisenreinigung bei Membran A, B und C

Im Anschluss an die Salzsäurebehandlung folgte die Eisenreinigung. Dazu wurden 6 kg Ferril in den Vorlagebehälter mit 150 l Leitungswasser gelöst und ein Vormembrandruck von 6,0 bar eingestellt. Unter denselben Bedingungen wurde die Eisenreinigung am Ende des gesamten Reinigungsverfahrens erneut durchgeführt. Es erfolgte eine quantitative Bestimmung von Eisen im Rücklauf bei 1 Stunde, 3 Stunden, 7 Stunden und 20 Stunden nach Reinigungsbeginn (siehe Tabelle 5 und Abbildung 15).

Tabelle 5: Konzentration von Eisen im Rücklauf der Eisenspülung in Abhängigkeit von der Zeit.

		Eisenkonzentration im Rücklauf [g/l]	von der Membranoberfläche entferntes Eisen [g]
Ferril_1:	1 h	0,63	94,5
	3 h	0,95	142
	20 h	1,10	165
Ferril_2:	1 h	0,04	6,00
	3 h	0,07	10,5
	7 h	0,09	13,5
	20 h	0,10	15,0

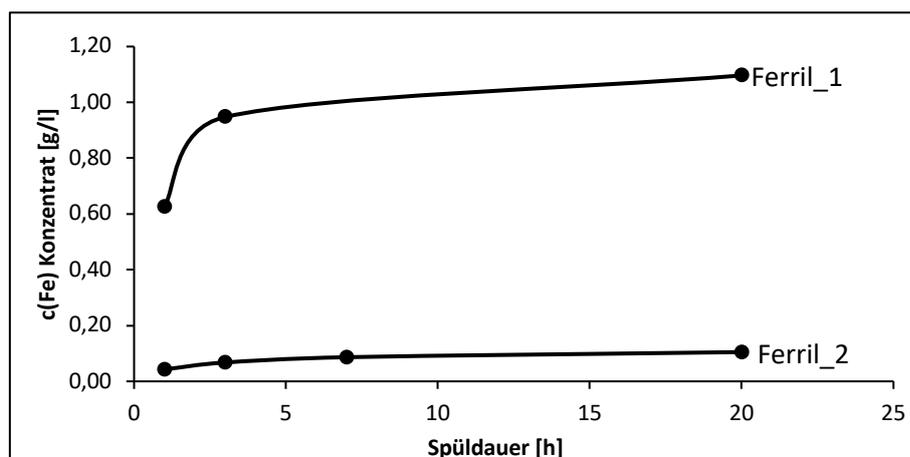


Abbildung 15

Untersuchung der Eisenkonzentration im Rücklauf in Abhängigkeit von der Zeit (Membran A, B und C).

Mit zunehmender Reinigungsdauer steigt die von der Membranoberfläche gelöste Menge an Eisen, wobei bereits nach 3 Stunden das meiste Eisen abgetragen wurde. Mit dem ersten Spülgang (Ferril_1) konnten nach 20 Stunden insgesamt 165 g Eisen von den Membranen entfernt werden. Die Reinigungszyklen bei der Eisenreinigung können auf ein bis zwei Reinigungszyklen beschränkt werden, da nach der zweiten Behandlung (Ferril_2) lediglich 15 g an Eisen nach 20 Stunden gelöst wurden.

3. Bariumreinigung bei Membran A, B und C

Im Rahmen der Bariumreinigung wurden bei jedem Reinigungszyklus dieselben Bedingungen angewendet. Diese umfassen das Lösen von 8 Litern des Bariumreinigers in einem System mit 150 Litern Leitungswasser und das Einstellen eines Nachmembrandruckes p_1 von 3,0 bar. Es wurden Proben aus dem Rücklauf bei 1 Stunde, 3 Stunden, 7 Stunden und 20 Stunden nach Reinigungsbeginn entnommen und die Konzentration von Bariumsulfat bestimmt. Zusätzlich wurde bei einigen Proben auch die Konzentration von Calcium und Eisen untersucht (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Konzentration von Bariumsulfat, Calcium und Eisen im Rücklauf bei den jeweiligen Bariumreinigungen in Abhängigkeit von der Zeit.

		Bariumsulfat [g/l]	Calcium [g/l]	Eisen [g/l]
Ba4_1:	1 h	4,58	-	-
	3 h	6,27	-	-
	7 h	6,46	-	-
	23 h	6,48	0,65	0,08
Ba4_2:	1 h	2,57	-	-
	3 h	3,19	-	-
	20 h	3,52	0,70	0,02
Ba4_3:	1 h	2,56	-	-
	3 h	3,24	-	-
	7 h	3,66	-	-
	20 h	3,98	0,27	0,02
Ba4_4:	1 h	1,89	-	-
	3 h	2,62	-	-
	7 h	2,88	-	-
	20 h	3,19	0,16	0,02

Tabelle 6: Fortsetzung

		Bariumsulfat [g/l]	Calcium [g/l]	Eisen [g/l]
Ba4_5:	1 h	1,58	-	-
	3 h	1,99	-	-
	7 h	2,45	-	-
	20 h	2,74	0,16	0,02
Ba4_6:	1 h	0,58	-	-
	3 h	0,63	-	-
	7 h	0,77	-	-
	20 h	0,97	0,12	0,02

Aufgrund der umfangreichen Salzsäurereinigung mit der entsprechenden Calciumentfernung verläuft der erste Reinigungszyklus mit Ba4 effizienter als bei Membran F festgestellt. Es wird bei Ba4_1 deutlich mehr Bariumsulfat von der Membranoberfläche abgetragen als bei den restlichen Reinigungszyklen. Da die Konzentration an Bariumsulfat im Rücklauf nach 3 bis 7 Stunden nicht mehr wesentlich zunimmt, ist von einer Sättigung der Reinigungswirkung von Ba4 auszugehen. Daher könnte der Reinigungsvorgang auf diesen Zeitraum im Hinblick auf Zeit- und Energieeinsparung beschränkt werden (siehe Abbildung 16).

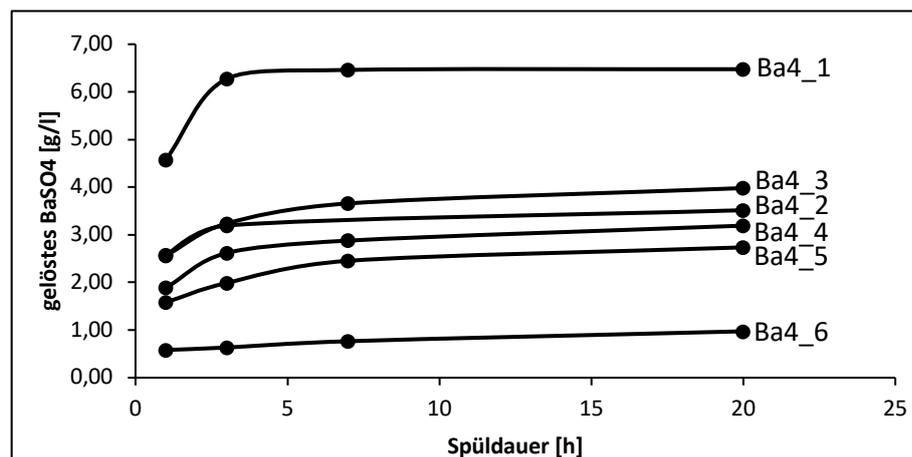


Abbildung 16

Untersuchung der Bariumsulfatkonzentration im Rücklauf in Abhängigkeit von der Zeit bei einem jeweiligen Reinigungszyklus mit Ba4 (Membran A, B und C).

Wird die ermittelte Konzentration an Bariumsulfat im Rücklauf auf das gesamte Volumen an Leitungswasser im System bezogen, so lässt sich **näherungsweise** die Menge des von der Membranoberfläche entfernten Bariumsulfats ermitteln (siehe Abbildung 17). Hierbei entspricht die angegebene Menge an Bariumsulfat bei einem Spülvorgang der Summe aus dem entfernten Bariumsulfat innerhalb eines Reinigungszyklus mit der entfernten Menge durch vorherige Behandlung/-en.

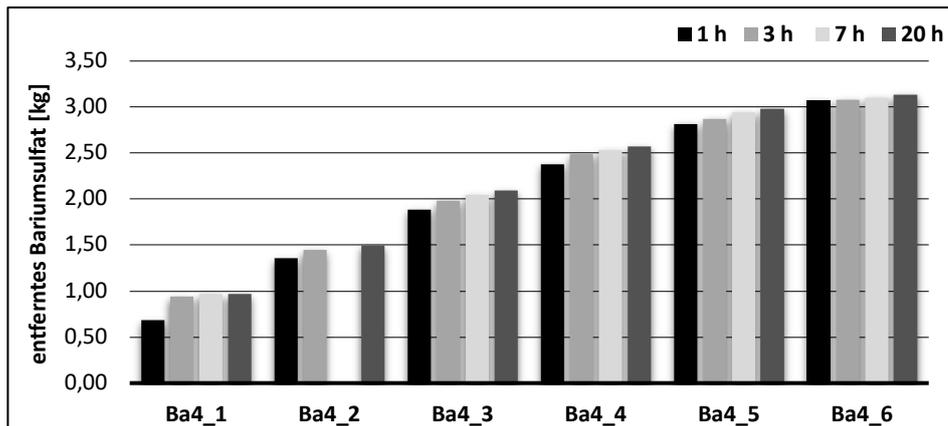


Abbildung 17

Die näherungsweise entfernte Menge an Bariumsulfat (kumuliert) (Membran A, B und C).

Zur Beurteilung der Auswirkung eines Reinigungszyklus auf die Permeatleistung wurde die Anlage nach einer Behandlung mit dem jeweiligen Reiniger mit Leitungswasser gespült, entleert und erneut mit Leitungswasser befüllt. Daraufhin erfolgte die Messung des Permeatflusses bei einer Temperatur T von 20°C und einen Nachmembrandruck p_1 von 2,9 bis 3,0 bar (siehe Abbildung 18).

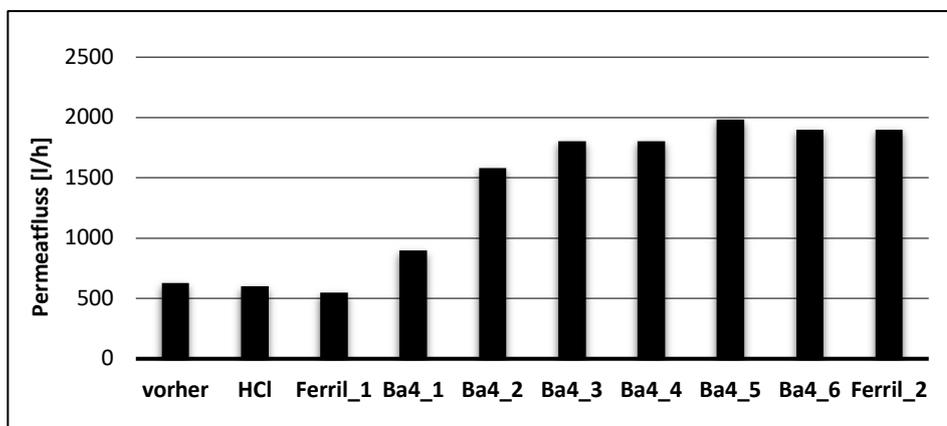


Abbildung 18

Untersuchung der Permeatleistung mit Leitungswasser nach einem jeweiligen Reinigungsvorgang. Die Zahl nach dem Unterstrich entspricht der Anzahl der durchgeführten Reinigungszyklen.

Insgesamt konnte eine Leistungssteigerung der Permeabilität um 216% erzielt werden.

Membran vor Reinigung 600 l/h (bei $T = 20^\circ\text{C}$ und $p_1 = 2,9 - 3,0$ bar)

Membran nach Reinigung 1900 l/h (bei $T = 20^\circ\text{C}$ und $p_1 = 2,9 - 3,0$ bar)

Für die technische Anwendung wurde die Permeatleistung der Membran A, B und C über den Durchlauf von Leitungswasser in die obere Straße in einem Temperaturbereich von 16°C bis 26°C untersucht. Die Messung erfolgte bei einem Nachmembrandruck p_1 von 2,0 bar, 3,0 bar und 4,0 bar (siehe Abbildung 19).

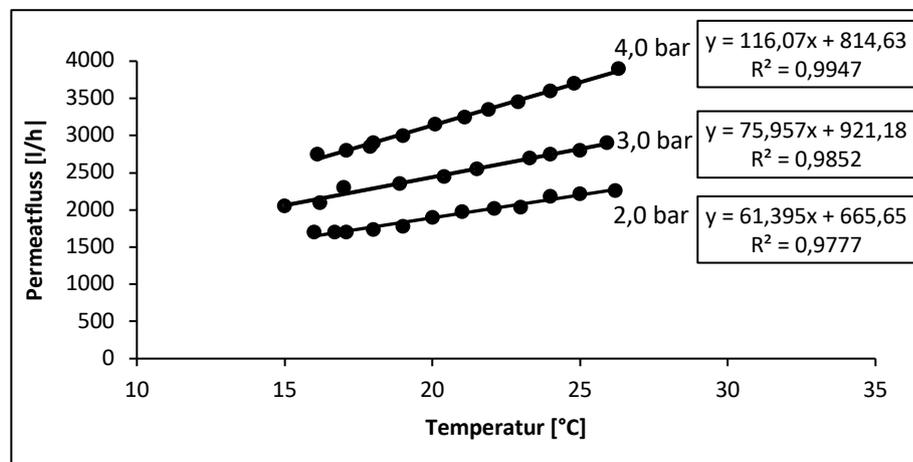


Abbildung 19

Untersuchung der Permeatleistung von Membran A, B und C mit Leitungswasser im oberen Druckrohr der Technikumsanlage bei einem Nachmembrandruck von 2,0 bar, 3,0 bar und 4,0 bar.

Für den relevanten Temperaturbereich, in dem das Abwasser in der Praxis behandelt wird, herrscht bei konstanten Druckverhältnissen ein linearer Zusammenhang zwischen der Permeabilität und der Temperatur. Aufgrund der herrschenden Proportionalität kann über die Wahl der Betriebsbedingungen die benötigte Permeatleistung abgeschätzt werden.

Zudem erfolgte die Untersuchung der Permeabilität in Abhängigkeit des Nachmembrandruckes p_1 . Hierzu wurde bei verschiedenen Drücken über den Durchlauf von Leitungswasser in die obere Straße der Permeatfluss bei einer Temperatur von 20,0°C und bei 25,0°C erfasst (siehe Abbildung 20).

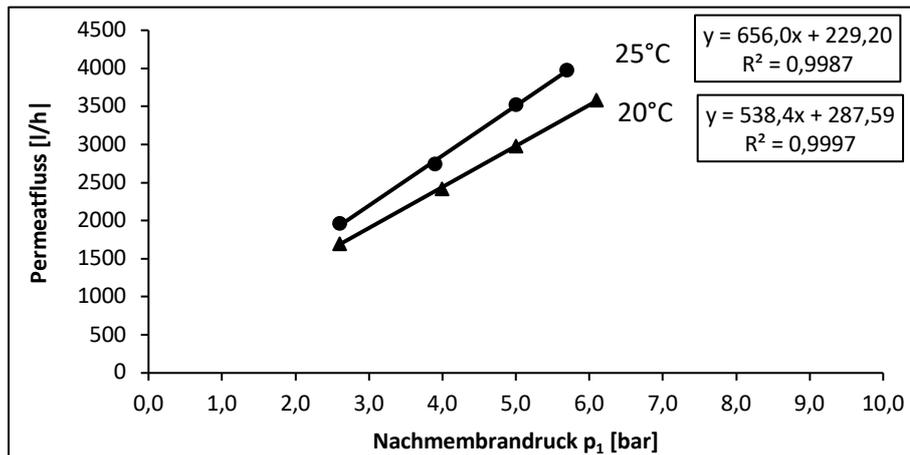


Abbildung 20

Untersuchung der Permeatleistung in Abhängigkeit vom Druck bei Membran A, B und C mit Leitungswasser im oberen Druckrohr bei einer Temperatur von 20°C und 25°C.

Im interessierenden Druckbereich von 2,5 und 6,0 bar ist der Permeatfluss proportional zum Druck, sodass in kleinerem Umfang die Möglichkeit besteht, die Leistung in Abhängigkeit des Druckes zu extrapolieren.

Ferner wurden die Membranen D, E und F im zweiten Druckrohr der Technikumsanlage eingesetzt und die Gesamtleistung der Membrananlage in Abhängigkeit der Temperatur bei einem Vormembrandruck p_0 von 5,9 bar und einem Nachmembrandruck p_1 von 3,7 bar untersucht. Jedoch wurde durch den eingesetzten Durchflussmesser die Messung des Permeatflusses auf 4000 l/h begrenzt. Aufgrund dessen wurde die Permeabilität beider Straßen getrennt voneinander untersucht und die Gesamtleistung als Summe beider Beiträge berechnet (siehe Abbildung 21).

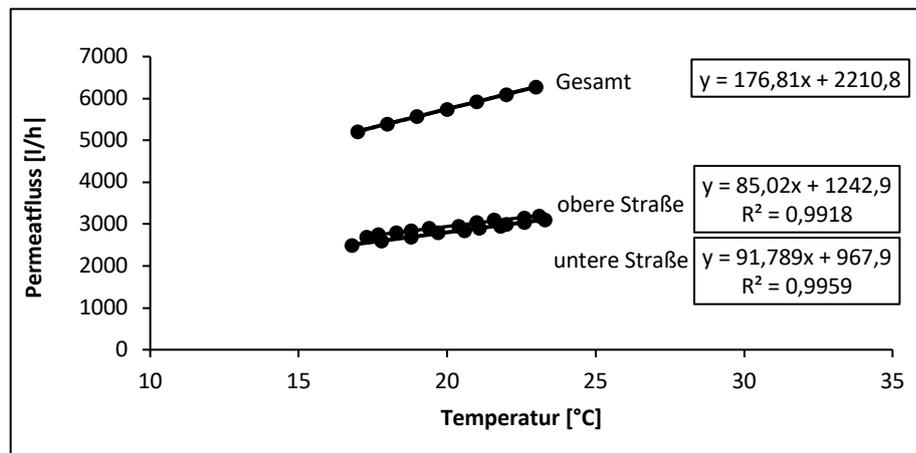


Abbildung 21

Untersuchung der Permeatleistung in Abhängigkeit von der Temperatur der oberen und unteren Straße und die daraus berechnete Gesamtleistung der Membrananlage.

Beide Straßen besitzen nahezu die gleiche Permeatleistung, weshalb als erste Näherung die ermittelten Betriebsparametern der oberen Straße mit Membran A, B und C ebenso für die untere Straße mit Membran D, E und F gelten.

Unter den gewählten Druckparametern hat die Fa. GUM bei der Inbetriebnahme der damaligen Membrananlage in der Fa. Prinovis die Gesamtpermeatleistung ebenfalls untersucht (siehe Abbildung 23 in Anlage 3). Dadurch ist ein Vergleich der Permeatleistung vor und nach dem zehnjährigen Einsatz der Membranen möglich.

Anlage Fa Prinovis 23.07.2012 6,1 m³/h (T = 22°C / p_0 = 5,9 bar / p_1 = 2,9 bar)

Anlage Fa GUM 21.01.2023 [6,1 ± 0,4] m³/h (T = 22°C / p_0 = 5,9 bar / p_1 = 2,9 bar)

Der angegebene Toleranzbereich ergibt sich näherungsweise über die Fehlerfortpflanzung aus der Quadratsumme der angenommen relativen Fehler des Druckes (± 5%), des Permeatflusses (± 5%) und der Temperatur (± 1%).

Nachdem die Untersuchungen zu der Leistungsfähigkeit der Membrananlage durch die Universität Wuppertal beendet wurde, hat die Firma GUM den Rückhalt der gereinigten BFR Membranen untersucht.

Dabei wurden Unterlagen zu Untersuchungen des Rückhaltes von organischen und anorganischen Substanzen am realen anfallenden Abwasser der Fa. Prinovis aus den Jahren 2012 bis 2018 ausgewertet.^[7] Die folgende Tabelle stellt eine Kurzfassung der Unterlagen dar.

Tabelle 7: Kurzfassung der durchgeführten Wasseranalyse an der Membrananlage der Fa. Prinovis aus den Jahren 2012 bis 2018.

	Datum	DOC mg/l	Leitf. mS/cm	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ²⁺ mg/l	Mg ²⁺ mg/l	Cl ⁻ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l
Feed	15.11.12	< 1,00	104	148	9,30	54,0	8,50	250	23,0
	02.04.14	1,73	-	110	8,30	51,0	7,90	220	-
	27.01.18	1,81	103	130	10,0	59,0	9,50	240	39,0
Permeat	15.11.12	0,10	25,8	44,0	3,10	2,20	0,28	68,0	< 1,00
	02.04.14	0,21	-	48,0	3,80	5,10	0,81	76,0	-
	27.01.18	0,45	51,0	68,0	18,0	18,0	3,20	120	9,00
Konzentrat	15.11.12	2,30	346	490	36,0	222	26,0	680	100
	02.04.14	5,30	-	460	35,0	280	43,0	890	-
	27.01.18	8,60	310	330	30,0	230	39,0	780	170

-: nicht bestimmt

Überschüssiges Natrium, Kalium und Chlorid wurden zu ca. 50 % entfernt und Härtebildner wie Calcium, Magnesium als auch Sulfate zu ca. 90 % zurückgehalten. Die im Feed enthaltene geringe Menge an organischer Substanz konnten nochmals deutlich reduziert werden. Die DOC-Analysen des Permeats wurden aufgrund der geringen Konzentration an gelösten organischen Kohlenstoff mit dem empfindlichen *Sievers 820 Portable Total Organic Carbon Analyser* durchgeführt.

Zur Bestimmung des Salzurückhaltes der gereinigten Membranen wurde die Anlage mit deionisiertes Wasser gespült, bis die Leitfähigkeit unter 10 µS/cm gesunken ist. Anschließend wurde das Wasser abgelassen, die Vorlage mit 200 l deionisiertes Wasser gefüllt und mit Natriumchlorid versetzt.

Der Natriumchloridgehalt wurde über die Leitfähigkeit bestimmt, wobei der Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Natriumchloridkonzentration über die Leitfähigkeitsmessung von Natriumchloridstandards bei 20°C erfolgte (siehe Abbildung 22 und Tabelle 8).

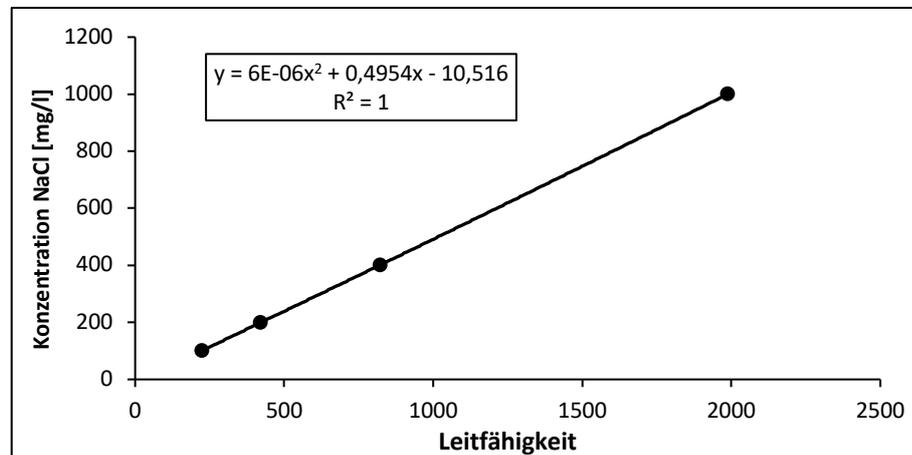


Abbildung 22

Zusammenhang zwischen Konzentration von Natriumchlorid und Leitfähigkeit bei 20°C.

Tabelle 8: Ermittlung des Natriumchloridgehaltes im Feed, Permeat und Konzentrat über die Leitfähigkeit bei einer Temperatur von 20°C, einen Vormembrandruck p_0 von 5,9 bar, einen Nachmembrandruck von 3,7 bar und gedrosselter Druckerhöhungspumpe sowie Kreislaufpumpe.

	Leitfähigkeit [μ S/cm]	Konzentration NaCl [mg/l]
Feed	378	178
Permeat	176	76,8
Konzentrat	1510	751

Bei einer Temperatur von 20°C, einen Vormembrandruck p_0 von 5,9 bar und einen Nachmembrandruck von 3,7 bar befindet sich ein Restgehalt von 43% an Natriumchlorid im Permeat, sodass ein Rückhalt von 57% stattgefunden hat. Dementsprechend befindet sich auch noch im Jahre 2022 der Rückhalt von Natrium über 50 %, sodass eine Änderung der Integrität trotz des neunjährigen Betriebes ausgeschlossen werden kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der durchgeführten Arbeiten und der entsprechenden Reinigung zum Entfernen der anorganischen Ablagerung konnte gezeigt werden, dass die in der Membrananlage der Fa. Prinovis eingesetzten BFR Membranen ohne eine signifikante Änderung der Integrität dieselbe Permeatleistung wie vor der Inbetriebnahme besitzen.

Anlage Fa Prinovis 23.07.2012 6,1 m³/h (T = 22°C / p₀ = 5,9 bar / p₁ = 2,9 bar)

Anlage Fa GUM 21.01.2023 [6,1 ± 0,4] m³/h (T = 22°C / p₀ = 5,9 bar / p₁ = 2,9 bar)

Die durch die anorganischen Ablagerungen eingetretenen Permeabilitätsminderungen werden im Wesentlichen durch Bariumsulfat verursacht. Erst durch den Einsatz von Ba4 haben die untersuchten BFR Membranen eine Leistungssteigerung erfahren. Es herrscht eine strenge Korrelation zwischen Permeatleistung und Bariumsulfatbelag. Die Effektivität der Bariumentfernung mit Ba4 und die dabei stattfindende Leistungssteigerung wird durch eine vorangegangene Entfernung von Calcium erhöht. Dementsprechend wirkt eine vorherige, umfangreiche Salzsäurereinigung für die Bariumentfernung unterstützend. Zum Lösen von Bariumsulfat sind, in Abhängigkeit des vorliegendem Bariumsulfatgehalts auf der Membran, mehrere Reinigungszyklen notwendig. Dabei kann die Dauer eines Reinigungszyklus auf 7 Stunden beschränkt werden, da eine Sättigung der Reinigungslösung innerhalb eines Reinigungszyklus eintritt. Auch wenn EPS auf der Membran nachgewiesen werden konnte, sind keine Störungen durch EPS bemerkbar, da nach der Bariumentfernung die Leistungssteigerung bis zu einem Maximum geht. Der Einfluss von Eisenablagerungen auf die Permeabilität fällt im Vergleich zu Bariumsulfat deutlich geringer aus. Ferril zeigt eine ausgezeichnete Reinigungswirkung gegenüber den Eisenbeläge, da sich bereits nach einem Reinigungsgang keine nennenswerten Mengen an Eisen auf den Membranoberflächen befanden. Die Reinigungswirkung von Ferril spiegelt sich ebenso in der Reinigungsdauer wider, da bereits nach 3 Stunden die Eisenablagerungen von der Membran entfernt wurden.

Wird auch in zukünftigen Membrananlagen mit BFR Membranen der Fa. GUM das Reinigungsverfahren regelmäßig durchgeführt, sollte eine jährliche Bariumentfernung die hohe Permeabilität bei gleichbleibendem Rückhalt von störenden Stoffen gewährleisten. Inwieweit der Einsatz von Antiscalant die Ablagerungen von Calcium, Eisen und Bariumsulfat auf den BFR Membranen verhindert, ist im Rahmen einer technischen Anwendung noch zu prüfen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] T. Wintgens: Wiederverwendung von behandeltem Abwasser – Anforderungen und Technologien, *13. Aachener Tagung Wassertechnologie*, Aachen, **2019**.
- [2] R. Fülling: Reinigung verblockter Membranen, *8. Aachener Tagung Wasser und Membranen*, Aachen, **2009**.
- [3] R. Fülling: Vortrag EnviroDTS, *Unveröffentlichtes Dokument*, Remscheid, **2019**.
- [4] M. Constapel, C. Fülling, R. Fülling, V. Martins, J. M. Marzinkowski: Charakterisierung von wasserlöslicher extrazellulärer polymerer Substanz und Membranbelägen aus Kläranlagen, *Vom Wasser*, 108 (3), **2010**.
- [5] M. Constapel, R. Fülling: Entfernung von Biofilmen und Verhinderung von Neuablagerungen, *10. Aachener Tagung Wasser und Membranen*, Aachen, **2013**.
- [6] R. Fülling: Wasserrecyclingverfahren nach Dr. Fülling Wassertechnologie, *Unveröffentlichtes Dokument*, Remscheid, **2018**.
- [7] R. Fülling: Messberichte von 2012 bis 2018, *Unveröffentlichtes Dokument*, Remscheid, **2023**.

7 Anlage

7.1 Anlage 1

Tabelle 20: Untersuchung von Membran E in der Prüfanlage vor der Reinigung.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
31.11.22	13:20	LW 1	3,0	2,6	140	29	-	17,3	660	297	-	17,2	245	-	17,1	800
31.11.22	13:50	LW 1	3,0	2,6	155	26	-	20,0	695	297	.	20,2	245	-	19,8	850

Tabelle 21: Untersuchung von Membran E in der Prüfanlage während und nach der Behandlung mit dem sauren Reiniger.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
31.11.22	15:42	Säure	3,0	2,6	155	-	2,07	19,9	695	-	2,02	19,9	-	1,99	19,9	850
31.11.22	15:52	Säure	3,0	2,6	155	-	2,30	20,4	695	-	2,34	20,6	-	2,11	20,5	850
31.11.22	16:01	Säure	3,0	2,6	155	-	2,31	21,0	695	-	2,35	20,9	-	2,14	20,9	850
31.11.22	18:00	Säure	3,0	2,6	155	-	-	-	695	-	2,39	26,7	-	2,36	26,4	850
31.11.22	18:30	Säure	3,0	2,6	155	-	-	-	695	-	2,53	32,5	-	-	-	850
02.11.22	12:20	LW 2	3,0	2,6	145	26	-	17,2	705	243	-	17,4	207	-	16,8	850
02.11.22	12:45	LW 2	3,0	2,6	155	25	-	19,7	705	233	-	19,7	186	-	19,4	850
02.11.22	13:15	LW 2	3,0	2,6	155	25	-	22,8	705	224	-	22,3	177	-	23,0	850

Tabelle 22: Untersuchung von Membran E in der Prüfanlage während und nach der Behandlung mit Ferril.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
02.11.22	14:40	Ferril_1	3,0	2,6	100	9250	-	25,3	750	17230	-	25,5	16020	-	25,1	850
02.11.22	15:35	Ferril_1	3,0	2,6	100	9140	-	26,7	750	27200	-	16,96	15970	-	26,9	850
03.11.22	08:00	Ferril_1	3,0	2,6	130	8160	1,75	28,6	720	-	-	-	14180	1,61	28,3	-
03.11.22	12:40	LW 3	3,0	2,6	140	24	5,45	17,8	710	274	7,16	17,8	221	7,08	17,3	850
03.11.22		LW 3	3,0	2,6	150	24	6,04	20,8	700	260	7,08	20,2	215	7,17	19,8	850
03.11.22	13:40	Ferril_2	3,0	2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	17800	1,59	20,2	-
03.11.22	17:15	Ferril_2	3,0	2,6	110	21000	1,31	27,5	640	26000	1,26	27,7				750
04.11	8:00	Ferril_2	3,0	2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	22700	1,32	33,8	-
04.11	13:45	LW 4	3,0	2,6	150	26	5,58	17,6	720	247	6,61	17,9	194	6,84	17,5	870
04.11	14:51	LW 4	3,0	2,6	155	24	5,67	20,6	720	214	6,71	20,8	178	6,60	20,3	875

Tabelle 23: Untersuchung von Membran E in der Prüfanlage während und nach der Behandlung mit Ferril.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
04.11.22	18:20	Ferril_3	3,0	2,6	100	21200	1,35	27,1	800	25500	1,33	27,4	25000	1,31	27,4	900
04.11.22	19:25	Ferril_3	3,0	2,6	110	21000	1,32	28,7	740	26200	1,33	29,1	24600	1,34	29,1	850
05.11.22	08:00	Ferril_3	3,0	2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	23600	1,34	34,2	-
06.11.22	08:00	Ferril_3	3,0	2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	23700	1,34	34,3	-
07.11.22	09:00	Ferril_3	3,0	2,6	-	-	-	-	-	-	-	-	28900	-	34,4	-
07.11.22	11:00	LW 5	3,0	2,6	135	29	5,20	15,8	715	178	6,10	15,9	158	6,07	15,5	850
07.11.22	-	LW 5	3,0	2,6	140	26	5,80	18,0	760	164	5,88	18,1	142	5,99	17,7	900
07.11.22	-	LW 5	3,0	2,6	155	22	5,40	20,4	715	153	5,94	20,4	130	5,90	20,2	870

Tabelle 24: Untersuchung von Membran E in der Prüfanlage während und nach der Behandlung mit Ba4_1.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
07.11.22	14:42	Ba4_1	3,4	-	< 100	2820	11,56	23,9	-	7710	11,42	23,9	7110	11,40	23,8	660
07.11.22	16:42	Ba4_1	3,4	-	< 100	2650	11,41	27,7	-	7880	11,10	27,6	7180	11,40	27,8	625
07.11.22	20:42	Ba4_1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7150	11,20	32,6	-
08.11.22	08:02	Ba4_1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7130	10,26	34,5	-
09.11.22	09:05	Ba4_1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6900	10,35	34,7	-
09.11.22	10:10	LW 6	3,0	2,6	320	36	8,12	14,8	540	418	7,75	14,9	269	7,89	14,2	860
09.11.22	10:10	LW 6	3,0	2,6	360	31	7,85	17,7	500	441	7,72	17,6	279	8,09	17,1	860
09.11.22	-	LW 6	3,0	2,6	400	30	7,83	20,4	475	435	8,07	20,4	283	8,22	20,1	875
09.11.22	-	LW 6	3,0	2,6	425	31	7,90	22,3	450	461	7,93	22,3	280	8,25	22,1	875

Tabelle 25: Untersuchung von Membran E in der Prüfanlage während und nach der Behandlung mit Ba4_2.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
09.11.22	13:40	Ba4_2	3,0	-	< 100	2890	-	24,5	-	7850	-	24,8	7010	-	24,7	900
09.11.22	15:40	Ba4_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
09.11.22	19:40	Ba4_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10.11.22	14:12	LW 7	3,0	2,6	400	42	8,82	15,9	400	479	8,51	15,9	277	8,58	15,5	800
10.11.22	14:40	LW 7	3,0	2,6	425	40	8,55	17,4	400	530	8,48	17,4	267	8,72	17,0	825
10.11.22	15:10	LW 7	3,0	2,6	450	40	8,67	19,1	350	525	8,46	19,2	269	8,54	18,8	800
10.11.22	15:41	LW 7	3,0	2,6	475	41	8,51	20,6	350	559	8,52	20,5	264	8,74	20,4	825
10.11.22	16:14	LW 7	3,0	2,6	500	42	8,44	22,1	325	575	8,44	22,0	260	8,71	21,9	825

Tabelle 26: Untersuchung von Membran E in der Prüfanlage während und nach der Behandlung mit Ba4_3.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
11.11.22	10:25	Ba4_3	3,0	-	<100	2790	11,99	19,0	-	7870	11,88	19,1	6680	12,12	18,8	875
11.11.22	12:25	Ba4_3	3,0	-	<100	3000	11,40	26,8	-	7520	11,09	27,1	7030	11,11	27,0	875
14.11.22	10:31	LW 8	3,0	2,6	400	32	7,75	14,6	450	385	8,03	14,6	225	7,97	14,1	850
14.11.22	11:10	LW 8	3,0	2,6	445	34	7,56	16,7	405	378	7,99	16,6	225	8,18	16,0	850
14.11.22	11:32	LW 8	3,0	2,6	455	33	7,48	17,9	380	417	8,05	17,8	217	8,18	17,4	825
14.11.22	-	LW 8	3,0	2,6	500	36	7,43	20,0	375	454	8,01	19,8	222	8,18	19,7	875
14.11.22	13:15	LW 8	3,0	2,6	525	36	-	22,4	350	463	8,01	22,4	208	8,14	22,3	875

Tabelle 27: Untersuchung von Membran E in der Prüfanlage während und nach der Behandlung mit Ba4_4.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
14.11.22	14:40	Ba4_4	3,0	-	100	2680	11,56	24,3	760	7170	11,45	24,6	6610	11,13	24,4	860
14.11.22	17:40	Ba4_4	3,0	-	100	2830	11,40	28,7	760	7310	11,16	29,3	6680	11,52	29,3	880
15.11.22	8:00	Ba4_4	3,0	2,6	100	2540	11,16	34,2	760	7220	10,85	34,9	6690	11,04	35,4	850
16.11.22	10:09	LW 9	3,0	2,6	410	32	8,34	14,3	440	380	8,44	14,9	227	8,51	13,7	850
16.11.22	10:45	LW 9	3,0	2,6	450	33	7,54	16,5	400	409	8,35	16,5	225	8,42	16,9	850
16.11.22	11:03	LW 9	3,0	2,6	460	35	7,81	17,7	390	435	8,09	17,7	216	8,35	17,1	850
16.11.22	11:29	LW 9	3,0	2,6	490	37	7,64	18,8	370	446	8,07	18,9	205	8,39	18,6	860
16.11.22	12:04	LW 9	3,0	2,6	510	39	-	20,6	365	474	-	20,8	198	-	20,4	875
16.11.22	12:30	LW 9	3,0	2,6	550	40	-	22,3	325	482	-	22,2	228	-	22,0	875

Tabelle 28: Untersuchung von Membran E in der Prüfanlage während und nach der Behandlung mit Ba4_5.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀	p ₁	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P	κ	pH	T	Q _K	κ	pH	T	κ	pH	T	Q _F
			[bar]	[bar]	[l/h]	[μS/cm]		[°C]	[l/h]	[μS/cm]		[°C]	[μS/cm]		[°C]	[l/h]
16.11.22	13:35	Ba4_5	3,0	2,6	110	2850	11,70	24,4	765	7111	11,50	24,3	6560	11,5	24,5	875
16.11.22	15:35	Ba4_5	3,0	2,6	120	2780	-	27,7	740	7220	-	27,8	6590	-	87,9	860
16.11.22	19:35	Ba4_5	3,0	2,6	120	2710	-	31,1	740	7230	-	31,0	6240	-	30,9	860
16.11.22	8:00	Ba4_5	3,0	2,6	120	2380	-	33,1	740	7250	-	32,7	6290	-	33,8	860
17.11.22	10:15	LW 10	3,0	2,6	390	37	8,98	13,6	460	432	8,46	13,7	255	8,70	13,1	850
17.11.22	10:42	LW 10	3,0	2,6	410	38	8,91	14,9	440	445	8,42	15,3	268	8,65	14,9	850
17.11.22	11:11	LW 10	3,0	2,6	450	39	9,18	17,0	400	498	8,40	16,9	262	8,77	16,6	850
17.11.22	12:20	LW 10	3,0	2,6	490	41	-	20,1	360	547	-	20,1	255	-	19,9	850

Tabelle 29: Untersuchung von Membran E in der Prüfanlage während und nach der Behandlung mit Ba4_6.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
17.11.22	13:27	Ba4_6	3,0	2,6	110	2700	-	21,8	780	7190	-	22,1	6520	-	21,9	890
17.11.22	15:27	Ba4_6	3,0	2,6	125	2750	11,97	25,2	775	7210	11,73	25,4	6540	11,82	25,5	890
17.11.22	19:30	Ba4_6	3,0	2,6	130	2750	-	29,3	740	7230	-	29,7	6570	-	29,4	870
18.11.22	8:00	Ba4_6	3,0	2,6	140	2430	-	33,0	710	7290	-	33,2	6540	-	33,3	850
18.11.22	11:40	LW 11	3,0	2,6	450	31	-	14,9	400	390	-	14,9	226	-	14,5	850
18.11.22	12:01	LW 11	3,0	2,6	460	32	-	16,7	410	406	-	16,6	261	-	16,3	870
18.11.22	12:40	LW 11	3,0	2,6	480	33	-	18,6	400	427	-	18,6	267	-	18,2	880
18.11.22	13:20	LW 11	3,0	2,6	500	35	-	20,2	380	447	-	20,2	265	-	20,0	880
18.11.22	13:55	LW 11	3,0	2,6	540	36	-	21,3	310	466	-	21,3	241	-	21,1	850
18.11.22	14:14	LW11	3,0	2,6	550	37	-	22,0	310	499	-	22,0	232	-	21,9	860

Tabelle 30: Untersuchung von Membran E in der Prüfanlage während und nach der Behandlung mit Ferril_4.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
18.11.22	15:20	Ferril_4	3,0	2,6	300	22300	1,30	23,3	600	26800	1,22	23,1	25500	1,00	22,9	900
18.11.22	17:20	Ferril_4	3,0	2,6	305	22200	0,91	24,9	585	26500	0,88	25,0	25100	1,08	24,7	890
18.11.22	8:30	Ferril_4	3,0	2,6	305	20800	1,10	32,9	595	25100	0,99	31,9	23600		32,1	900
19.11.22	-	LW 12	3,0	2,7	430	22	6,12	13,9	420	292	7,08	13,9	195	7,12	13,3	850
19.11.22	-	LW 12	3,0	2,7	440	24	-	14,7	-	324	-	14,7	189	-	14,2	-
19.11.22	-	LW 12	3,0	2,7	450	23	-	15,3	400	321	-	15,4	173	-	14,9	850
19.11.22	15:50	LW 12	3,0	2,7	450	25	-	16,2	450	291	-	16,4	171	-	16,0	900
19.11.22	16:10	LW 12	3,0	2,7	460	23	-	17,7	430	306	-	17,6	171	-	17,0	890
19.11.22	-	LW 12	3,0	2,7	470	22	-	18,1	410	306	-	18,3	186	-	18,0	880
19.11.22	16:45	LW 12	3,0	2,6	480	22	-	19,1	410	310	-	19,2	185	-	19,0	890

Tabelle 30: Fortsetzung

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
19.11.22	17:00	LW 12	3,0	2,6	500	22	-	20,9	380	316	-	20,2	175	7,27	20,0	880
19.11.22	-	LW 12	3,0	2,6	520	22	-	21,3	360	326	-	21,2	153	7,00	21,0	880
19.11.22	-	LW 12	3,0	2,6	540	22	6,4	22,1	350	326	-	22,1	156	-	22,0	890
19.11.22	-	LW 12	3,0	2,6	560	22	-	23,2	330	334	-	23,1	142	-	23,0	890
19.11.22	-	LW 12	3,0	2,6	570	22	-	24,4	-	333	-	24,4	137	-	24,1	-
19.11.22	-	LW 12	3,0	2,6	580	22	-	25,1	-	338	-	25,1	137	-	25,0	-

7.2 Anlage 2

Tabelle 31: Untersuchung von Membran A, B, und C in der Technikumsanlage vor der Reinigung.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
10.11.22	9:52	LW 1	6,1	2,9	630	97	6,62	18,9	270	228	6,48	19,3	164	6,42	18,3	7500
10.11.22	10:09	LW 1	6,1	2,9	630	60	6,02	20,0	270	210	5,81	20,1	189	5,88	20,0	7500
10.11.22	10:31	LW 1	6,1	2,9	700	53	5,95	22,0	240	206	5,80	22,2	18,3	5,95	22,0	7500

Tabelle 32: Untersuchung von Membran A, B, und C in der Technikumsanlage während und nach der Reinigung mit HCl.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q _P [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _K [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q _F [l/h]
10.11.22	10:45	HCL1	6,1	3,2	600	3140	2,00	22,8	260	3520	3,05	23,6	3440	2,97	23,1	8500
10.11.22	11:45	HCL1	6,1	3,2	610	1210	4,36	26,7	250	3090	4,60	26,9	2830	4,60	27,0	8500
10.11.22	12:50	HCL2	6,0	3,5	590	2300	3,72	30,0	250	5750	4,10	30,6	5360	4,07	30,7	8750
10.11.22	14:00	HCL3	6,0	3,5	590	2790	3,62	32,2	250	6850	3,94	32,8	6380	3,90	32,9	8750
10.11.22	15:05	HCL4	6,0	3,5	580	3310	3,44	33,7	250	7880	3,77	34,1	7370	3,72	34,3	9000
11.11.22	9:16	LW 2	6,0	2,9	580	121	6,84	17,7	320	399	7,01	17,8	370	7,27	17,6	9000
11.11.22	9:31	LW 2	6,0	2,9	590	110	6,60	18,3	320	362	6,83	13,6	338	6,94	18,3	9000
11.11.22	9:51	LW 2	6,0	2,9	600	97	6,46	20,0	330	347	6,65	20,0	323	6,79	19,9	9000
11.11.22	10:23	LW 2	6,0	2,9	610	93	6,22	22,1	330	338	6,29	22,3	312	6,34	22,1	8750

Tabelle 33: Untersuchung von Membran A, B, und C in der Technikumsanlage während und nach der Reinigung mit Ferril_1.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀	p ₁	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q	κ	pH	T	Q	κ	pH	T	κ	pH	T	Q
			[bar]	[bar]	[l/h]	[μS/cm]		[°C]	[l/h]	[μS/cm]		[°C]	[μS/cm]		[°C]	[l/h]
11.11.22	10:25	Ferril 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13.11.22	11:55	LW 3	5,8	5,0	700	42	-	16,3	300	201	-	16,6	181	-	16,5	5700
13.11.22		LW 3	5,1	4,0	600	41	-	16,9	300	193	-	17,0	-	-	16,8	7500
13.11.22	12:05	LW 3	4,2	3,0	500	41	-	17,1	300	185	-	17,3	173	-	17,3	8200
13.11.22	12:20	LW 3	4,2	2,9	470	38	-	18,1	300	175	-	18,4	164	-	18,2	8000
13.11.22	12:50	LW 3	4,2	2,9	550	33	6,69	20,1	320	160	6,95	19,9	148	-	20,0	7800

Tabelle 34: Untersuchung von Membran A, B, und C in der Technikumsanlage während und nach der Reinigung mit Ba4_1.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]
16.11.22	11:50	Ba4_1	4,6	3,0	< 400	10040	-	22,0	370	15770	-	20,9	15320	-	22,3	12000
16.11.22	13:50	Ba4_1	4,5	3,0	< 400	11170	-	28,2	< 100	15470	-	27,8	15400	-	28,2	13000
16.11.22	17:50	Ba4_1	4,4	3,1	< 400	12250	-	35,8	< 100	15440	-	33,3	15450	-	34,8	11500
17.11.22	8:00	Ba4_1	4,2	3,2	< 400	11500	-	38,4	k.A	15450	-	38,4	15600	-	39,8	k.A
17.11.22	11:40	LW 4	3,7	2,9	880	69	-	15,4	400	370	-	15,2	320	-	15,0	8500
17.11.22	11:50	LW 4	3,7	2,8	890	69	-	16,1	300	397	-	16,3	340	-	16,0	k.A
17.11.22	12:20	LW 4	3,8	3,0	900	66	-	18,6	300	427	-	18,4	363	-	18,4	8000
17.11.22	12:40	LW 4	3,8	3,0	900	68	-	19,9	300	432	-	19,9	364	-	19,9	k.A
17.11.22	13:10	LW 4	3,6	2,9	940	65	-	21,9	300	447	-	22,0	369	-	21,9	8000

Tabelle 35: Untersuchung von Membran A, B, und C in der Technikumsanlage während und nach der Reinigung mit Ba4_2.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀	p ₁	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q	κ	pH	T	Q	κ	pH	T	κ	pH	T	Q
			[bar]	[bar]	[l/h]	[μS/cm]		[°C]	[l/h]	[μS/cm]		[°C]	[μS/cm]		[°C]	[l/h]
17.11.22	14:20	Ba4_2	4,7	3,8	< 400	8800	-	25,3	300	13990	-	k.A.	13190	-	25,5	10000
17.11.22	16:20	Ba4_2	4,7	3,8	< 400	9310	-	30,8	300	14200	-	30,6	14990	-	30,1	10000
17.11.22	20:20	Ba4_2	4,5	3,7	< 400	9520	-	36,1	300	14420	-	36,5	14190	-	35,8	10000
17.11.22	8:00	Ba4_2	7,6	2,0	< 400	10690	-	35,9	300	14070	-	35,7	14160	-	37,4	1000
18.11.22	11:41	LW 5	3,8	2,9	1250	40	-	14,8	300	307	-	14,9	255	-	14,6	8600
18.11.22	11:41	LW 5	3,7	2,8	1350	40	-	16,6	300	322	-	16,6	260	-	16,5	8500
18.11.22	11:41	LW 5	3,8	3,0	1420	39	-	18,4	300	338	-	18,5	268	-	18,2	800
18.11.22	11:41	LW 5	3,8	3,0	1580	39	-	20,1	300	353	-	20,3	258	-	20,0	7500
18.11.22	11:41	LW 5	3,7	3,0	1620	39	-	22,0	300	367	-	22,2	275	-	22,0	7000

Tabelle 36: Untersuchung von Membran A, B, und C in der Technikumsanlage während und nach der Reinigung mit Ba4_3.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]
18.11.22	13:30	Ba4_3	3,8	3,0	< 400	9640	-	25,8	300	-	-	-	13110	-	23,2	10500
18.11.22	14:30	Ba4_3	3,6	2,9	< 400	9820	-	26,4	300	13660	-	26,4	13640	-	26,3	10000
18.11.22	16:30	Ba4_3	3,5	2,9	< 400	9870	-	30,9	300	13920	-	31,4	13790	-	31,6	10000
18.11.22	20:30	Ba4_3	3,4	2,8	< 400	10030	-	35,5	300	13900	-	36,0	13770	-	36,2	9800
19.11.22	8:00	Ba4_3	3,8	3,1	< 400	9890	-	35,8	300	13970	-	35,7	13780	-	36,3	10000
19.11.22	-	LW 6	3,4	3,0	1400	45	-	15,5	300	424	-	15,6	299	-	15,3	4300
19.11.22	-	LW 6	3,3	2,9	1420	44	-	16,1	300	421	-	16,3	319	-	16,0	
19.11.22	16:10	LW 6	4,1	3,0	1580	37	-	14,6	350	270	-	14,7	195	-	14,4	1200
19.11.22	-	LW 6	4,1	3,0	1600	37	-	15,2	340	272	-	15,4	223	-	15,1	1250
19.11.22	16:34	LW 6	4,0	3,0	1630	36	-	16,3	340	274	-	16,4	204	-	16,0	1250

Tabelle 36: Fortsetzung.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]
19.11.22	-	LW 6	4,0	3,0	1660	37	-	17,1	340	275	-	17,2	210	-	17,0	1200
19.11.22	-	LW 6	4,0	3,0	1700	37	-	18,0	340	281	-	18,1	218	-	18,0	1250
19.11.22	-	LW 6	3,9	2,9	1820	37	-	20,0	330	287	-	20,0	232	-	20,0	1200
19.11.22	-	LW 6	3,9	2,9	1900	37	-	21,3	320	292	-	21,2	232	-	21,2	1170
19.11.222	-	LW 6	4,0	3,0	1950	37	-	21,4	320	293	-	-	-	-	21,5	-
19.11.22	-	LW 6	4,0	3,0	1980	37	-	22,1	310	293	-	22,1	230	-	22,0	1150
19.11.22	-	LW 6	3,9	2,9	2040	37	-	23,0	310	296	-	23,0	222	-	23,0	1150
19.11.22	-	LW 6	3,9	2,9	2100	37	-	24,1	310	300	-	24,1	227	-	24,1	1150
19.11.22	-	LW 6	3,9	3,0	2150	38	-	25,0	310	306	-	25,0	227	-	25,0	1150
19.11.22	-	LW 6	3,9	3,0	2250	38	-	26,0	305	310	-	25,0	225	-	26,0	1150

Tabelle 37: Untersuchung von Membran A, B, und C in der Technikumsanlage während und nach der Reinigung mit Ba4_4.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]
Ba4_4																
23.11.22	9:30	LW 7	4,0	3,0	1530	42	-	13,0	300	323	-	13,1	252	-	13,0	12000
23.11.22	-	LW 7	4,0	3,0	1580	41	-	14,4	300	327	-	14,4	252	-	14,2	11500
23.11.22	-	LW 7	4,0	3,0	1620	40	-	15,7	300	331	-	15,7	245	-	15,6	11500
23.11.22	10:25	LW 7	3,9	2,9	1720	40	-	17,2	300	332	-	17,2	263	-	17,1	1100
23.11.22	10:40	LW 7	3,9	2,9	1780	40	-	18,2	300	335	-	18,2	241	-	18,2	11000
23.11.22	-	LW 7	3,8	2,9	1800	39	-	20,1	300	342	-	20,1	268	-	20,1	11000
23.11.22	-	LW 7	4,5	4,0	2450	48	-	20,1	300	382	-	20,3	258	-	20,2	5000
23.11.22	-	LW 7	5,4	5,2	3100	45	-	20,5	200	466	-	-	-	-	20,3	< 4000

Tabelle 38: Untersuchung von Membran A, B, und C in der Technikumsanlage während und nach der Reinigung mit Ba4_5.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀	p ₁	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q	κ	pH	T	Q	κ	pH	T	κ	pH	T	Q
			[bar]	[bar]	[l/h]	[μS/cm]		[°C]	[l/h]	[μS/cm]		[°C]	[μS/cm]		[°C]	[l/h]
23.11.22	11:50	Ba4_5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24.11.22	12:30	LW 8	4,0	2,9	1470	38	-	13,1	850	292	-	13,1	234	-	13,0	6500
24.11.22	-	LW 8	4,0	2,9	1570	38	-	14,2	850	299	-	14,3	230	-	14,1	6500
24.11.22	-	LW 8	3,9	2,9	1620	38	-	15,4	850	305	-	15,4	238	-	15,2	-
24.11.22	-	LW 8	3,9	2,9	1680	38	-	16,3	850	307	-	16,3	239	-	16,1	4500
24.11.22	-	LW 8	3,8	2,8	1750	38	-	17,4	850	312	-	17,4	239	-	17,3	4500
24.11.22	-	LW 8	4,0	3,0	1900	38	-	18,1	300	318	-	18,0	236	-	18,0	5000
24.11.22	-	LW 8	4,0	3,0	1950	38	-	19,1	300	322	-	19,1	233	-	19,0	5000
24.11.22	13:55	LW 8	4,0	3,0	1980	37	-	20,0	300	323	-	20,0	233	-	20,0	5000
24.11.22	-	LW 8	3,9	3,0	2020	38	-	21,0	300	324	-	21,1	231	-	21,0	5000

Tabelle 39: Untersuchung von Membran A, B, und C in der Technikumsanlage während und nach der Reinigung mit Ba4_6.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]
24.11.22	14:15	Ba4_6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25.11.22	14:30	LW 9	3,9	3,0	1500	34	-	14,1	250	328	-	14,2	240	-	14,0	5000
25.11.22	-	LW 9	3,8	2,9	1550	33	-	15,3	250	337	-	15,4	244	-	15,1	5000
25.11.22	-	LW 9	3,8	3,0	1750	32	-	17,1	250	353	-	17,2	246	-	17,0	5000
25.11.22	-	LW 9	3,8	3,0	1780	32	-	18,1	220	358	-	18,1	252	-	18,0	4800
25.11.22	-	LW 9	3,7	3,0	1830	35	-	-	220	365	-	19,2	249	-	19,0	4800
25.11.22	-	LW 9	3,7	3,0	1900	32	-	20,5	220	371	-	20,4	257	-	20,4	4800
25.11.22	-	LW 9	3,7	3,0	2070	33	-	22,1	220	386	-	22,1	253	-	22,0	4500
25.11.22	-	LW 9	3,7	3,0	2100	33	-	23,0	220	302	-	23,0	248	-	23,0	4500
25.11.22	-	LW 9	3,7	3,0	2140	33	-	24,0	200	396	-	24,0	247	-	24,0	4000
25.11.22	-	LW 9	3,6	3,0	2180	33	-	25,0	-	401	-	25,0	246	-	25,0	4000

Tabelle 40: Untersuchung von Membran A, B, und C in der Technikumsanlage während und nach der Reinigung mit Ferril_2.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]
26.11.22	-	Ferril_2	-	-	-	-	-	-	-	--	-	-	-	-	-	-
01.12.22	9:40	LW10	3,5	3,0	1700	22	-	15,6	470	218	-	15,6	181	-	15,6	11500
01.12.22	9:47	LW10	3,5	3,0	1700	19	-	16,0	470	214	-	16,0	178	-	16,0	11500
01.12.22	-	LW10	3,5	3,0	1700	18	-	16,7	470	219	-	16,8	174	-	16,7	11500
01.12.22	-	LW10	3,4	2,9	1700	17	-	17,1	470	218	-	17,1	170	-	17,1	10500
01.12.22	10:14	LW10	3,4	2,9	1740	14	-	18,0	470	219	-	18,1	168	-	18,1	11250
01.12.22	10:26	LW10	3,4	2,9	1780	13	-	19,0	470	222	-	19,0	173	-	19,0	11250
01.12.22	-	LW10	3,5	3,0	1900	13	-	20,0	460	226	-	20,0	168	-	20,0	11000
01.12.22	-	LW10	3,5	3,0	1980	12	-	21,0	460	226	-	21,0	168	-	21,0	11000
01.12.22	11:16	LW10	3,4	2,9	2020	12	-	22,1	440	232	-	22,2	168	-	22,1	10500

Tabelle 40: Fortsetzung.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]
01.12.22	11:29	LW10	3,4	2,9	2040	12	-	23,0	440	234	-	23,0	168	-	23,0	10500
01.12.22	11:47	LW10	3,5	3,0	2180	12	-	24,0	440	237	-	24,0	168	-	24,0	10000
01.12.22	12:07	LW10	3,5	3,0	2220	12	-	25,0	450	239	-	25,0	168	-	25,0	10000
01.12.22	-	LW10	3,5	3,0	2260	12	-	26,2	450	240	-	26,2	168	-	26,2	9500

Tabelle 41: Untersuchung der Permeatleistung von Membran A, B und C mit Leitungswasser bei einem Nachmembrandruck von 2,0 bar.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]
21.01.23	-	LW11	6,0	2,0	1950	-	-	13,4	500	-	-	13,4	-	-	-	-
21.01.23	-	LW11	6,0	2,0	2050	-	-	15,0	490	-	-	15,0	-	-	-	-
21.01.23	-	LW11	6,0	2,0	2100	-	-	16,2	490	-	-	16,2	-	-	-	-
21.01.23	-	LW11	6,0	2,0	2300	-	-	17,5	490	-	-	17,5	-	-	-	-
21.01.23	-	LW11	6,0	2,0	2350	-	-	18,9	500	-	-	18,9	-	-	-	-
21.01.23	-	LW11	6,0	2,0	2450	-	-	29,4	500	-	-	29,4	-	-	-	-
21.01.23	-	LW11	6,0	2,0	2550	-	-	21,5	500	-	-	21,5	-	-	-	-
21.01.23	-	LW11	6,0	2,0	2700	-	-	23,3	500	-	-	23,3	-	-	-	-
21.01.23	-	LW11	6,0	2,0	2750	-	-	24,0	500	-	-	24,0	-	-	-	-
21.01.23	-	LW11	6,0	2,0	2800	-	-	25,0	500	-	-	25,0	-	-	-	-
21.01.23	-	LW11	6,0	2,0	2900	-	-	25,9	490	-	-	25,9	-	-	-	-

Tabelle 42: Untersuchung der Permeatleistung von Membran A, B und C mit Leitungswasser bei einem Nachmembrandruck von 4,0 bar.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]
21.01.23	-	LW12	6,0	4,0	2800	-	-	14,7	500	-	-	14,7	-	-	-	-
21.01.23	-	LW12	6,0	4,0	2850	-	-	17,9	490	-	-	17,9	-	-	-	-
21.01.23	-	LW12	6,0	4,0	2900	-	-	18,0	490	-	-	18,0	-	-	-	-
21.01.23	-	LW12	6,0	4,0	3000	-	-	19,0	490	-	-	19,0	-	-	-	-
21.01.23	-	LW12	6,0	4,0	3150	-	-	20,1	500	-	-	20,1	-	-	-	-
21.01.23	-	LW12	6,0	4,0	3250	-	-	21,1	500	-	-	21,1	-	-	-	-
21.01.23	-	LW12	6,0	4,0	3350	-	-	21,9	500	-	-	21,9	-	-	-	-
21.01.23	-	LW12	6,0	4,0	3450	-	-	22,9	500	-	-	22,9	-	-	-	-
21.01.23	-	LW12	6,0	4,0	3600	-	-	24,0	500	-	-	24,0	-	-	-	-
21.01.23	-	LW12	6,0	4,0	3700	-	-	24,8	500	-	-	24,8	-	-	-	-
21.01.23	-	LW12	6,0	4,0	3800	-	-	26,3	500	-	-	26,3	-	-	-	-

Tabelle 43: Untersuchung der Permeatleistung in Abhängigkeit vom Druck bei Membran A, B und C mit Leitungswasser bei einer Temperatur von 20°C und 25°C.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat				Konzentrat				Feed			
					Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]	Q [l/h]
01.12.22	13:29	LW13	3,1	2,6	1960	16	-	25,0	470	227	-	25,0	170	-	25,0	11000
01.12.22	-	LW13	4,1	3,9	2740	15	-	25,0	410	248	-	25,0	159	-	25,0	7500
01.12.22	-	LW13	5,0	5,0	3520	24	-	25,0	300	305	-	25,0	146	-	25,0	4000
01.12.22	-	LW13	5,7	5,7	3980	19	-	25,0	< 100	282	-	25,0	121	-	25,0	< 4000
01.12.22	-	LW13	3,1	3,6	1700	24	-	20,0	> 1000	244	-	20,0	189	-	20,0	-
01.12.22	-	LW13	4,1	4,0	2420	18	-	20,1	> 1000	238	-	20,1	170	-	20,1	< 4000
01.12.22	-	LW13	5,0	5,0	2990	20	-	20,0	> 1000	304	-	20,0	157	-	20,0	< 4000
01.12.22	-	LW13	6,1	6,1	3580	29	-	20,0	> 1000	460	-	20,0	144	-	20,0	< 4000

Tabelle 44: Messdaten zur Leistungsüberprüfung der unteren Straße der Technikumsanlage (Membran D, E und F) unter gleichen Bedingungen wie bei der Fa. Prinovis.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀	p ₁	Permeat			
					Q	κ	pH	T
			[bar]	[bar]	[l/h]	[μS/cm]		[°C]
31.01.23	9:00	LW 14	5,9	3,7	2500	-	-	16,8
31.01.23	-	LW 14	5,9	3,7	2600	-	-	17,8
31.01.23	-	LW 14	5,9	3,7	2700	-	-	18,8
31.01.23	-	LW 14	5,9	3,7	2800	-	-	19,7
31.01.23	-	LW 14	5,9	3,7	2850	-	-	20,6
31.01.23	-	LW 14	5,9	3,7	2900	-	-	21,1
31.01.23	-	LW 14	5,9	3,7	2950	-	-	21,8
31.01.23	-	LW 14	5,9	3,7	3000	-	-	22
31.01.23	-	LW 14	5,9	3,7	3050	-	-	22,6
31.01.23	-	LW 14	5,9	3,7	3100	-	-	23,3

Tabelle 45: Messdaten zur Leistungsüberprüfung der oberen Straße der Technikumsanlage (Membran A, B und C) unter gleichen Bedingungen wie bei der Fa. Prinovis.

Datum	Uhrzeit	Behandlung	p ₀ [bar]	p ₁ [bar]	Permeat			
					Q [l/h]	κ [μS/cm]	pH	T [°C]
31.01.23	9:00	LW 15	5,9	3,7	2700	-	-	17,3
31.01.23	-	LW 15	5,9	3,7	2750	-	-	17,7
31.01.23	-	LW 15	5,9	3,7	2800	-	-	18,3
31.01.23	-	LW 15	5,9	3,7	2850	-	-	18,8
31.01.23	-	LW 15	5,9	3,7	2900	-	-	19,4
31.01.23	-	LW 15	5,9	3,7	2950	-	-	20,4
31.01.23	-	LW 15	5,9	3,7	3050	-	-	21
31.01.23	-	LW 15	5,9	3,7	3100	-	-	21,6
31.01.23	-	LW 15	5,9	3,7	3150	-	-	22,6
31.01.23	-	LW 15	5,9	3,7	3200	-	-	23,1

7.3 Anlage 3

Messreihe am 20.07.2012	Anzahl Module [Stk.]	Q Feed [m³/h]	Q Permeat [m³/h]	Q Konzentrat [Ltr./h]	Q Kreislauf [Ltr./h]	P Beutelfilter [bar]	P Eingang Module [bar]	P Ausgang Module [bar]	P Ausgang Permeat [bar]	Leitfähigkeit Feed [µS]	Leitfähigkeit Permeat [µS]	Leitfähigkeit Konzentrat [µS]	Temperatur Feed [C°]
1	2	2,4	2,4	0	27000	3,9	3,3	1,1	0,3				
2	2	2,57	2,12	500 (eingestellt)	27000	3,8	3,1	0,9	0,3				
3	1	1,33	1,2	190 (Einst.unver.)	19000	5	4,1	0,1	0,3				
4	2	5,47	4,77	900 (Einst.unver.)	26500	1,5	5,4	3	0,55				
5	1	4,42	3,67	920 (Einst.unver.)	17500	2,6	7,9	3,9	0,5				
6	2	6,34	5,5	910 (Einst.unver.)	26000	0,7	6	3,8	0,65				
7	1	4,86	4,04	960 (Einst.unver.)	17500	2,2	8,6	4,6	0,5				
8	2	5	4,44	740 (Einst.unver.)	26500	2	5	2,7	0,5				
Messreihe am 23.07.2012	Anzahl Module [Stk.]	Q Feed [m³/h]	Q Permeat [m³/h]	Q Konzentrat [Ltr./h]	Q Kreislauf [Ltr./h]	P Beutelfilter [bar]	P Eingang Module [bar]	P Ausgang Module [bar]	P Ausgang Permeat [bar]	Leitfähigkeit Feed [µS]	Leitfähigkeit Permeat [µS]	Leitfähigkeit Konzentrat [µS]	Temperatur Feed [C°]
1	2	2,76	2,25	540	27000	3,6	3	0,6		150	31	724	21
2	2	6,54	6,1	500 (eingestellt)	26500	0,4	5,9	3,7		120	125	884	22
3	2	5,2	4,8	500 (eingestellt)	26500	2	4,9	2,6		162			
4	2	5,1	4,7	500 (eingestellt)	26500	1,9	4,7	2,5		127	27	983	24
5	2	6,5	6,1	500 (eingestellt)	26500	0,5	5,9	3,6		119	24	1084	
6	1	5	4,5	500 (eingestellt)	18000	2	8,4	4,2		126	11	1026	25 °

Abbildung 23

Messdaten zur Leistungsfähigkeit der Membranen A bis F bei Inbetriebnahme in der Membrananlage der Fa. Prinovis. Gekennzeichnet ist die verwendete Vergleichsmessung.

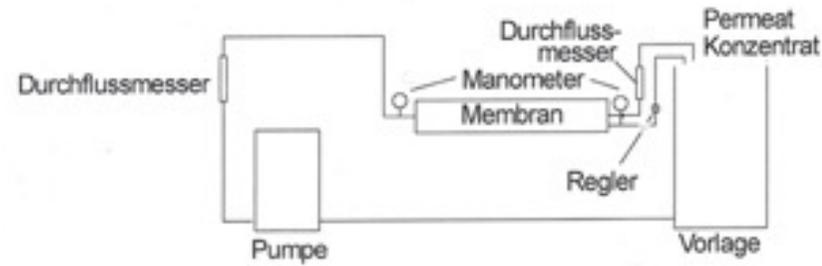


Abbildung 24

Fließschema zur Darstellung der Prüfanlage.

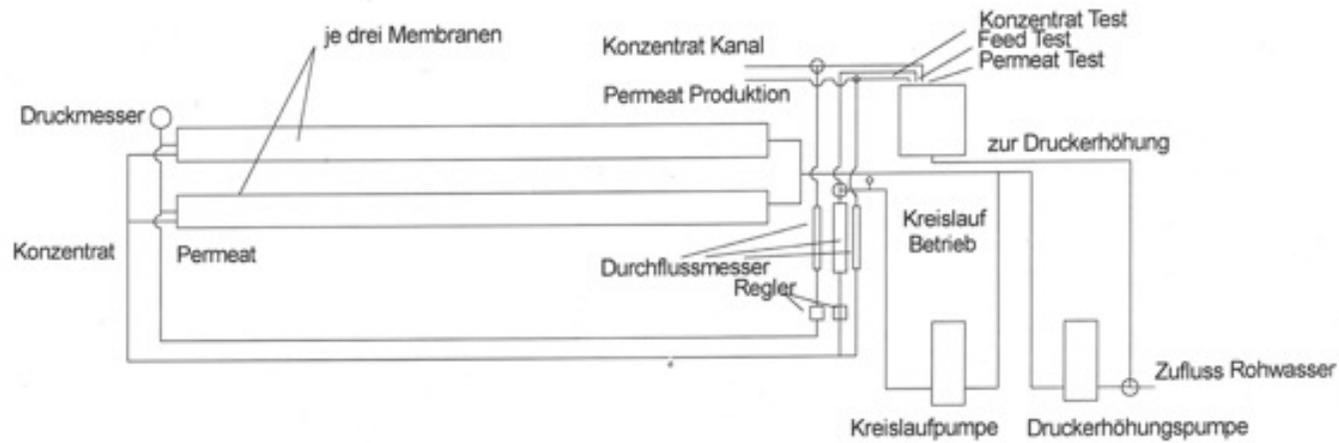


Abbildung 25

Fließschema zur Darstellung der Technikumsanlage.

Bergische Universität Wuppertal

Arbeitskreis Management chemischer Prozesse in der Industrie und Analytische Chemie

Wuppertal, den 31. Mai 2023

Arbeitskreis Management chemischer F

Wuppertal, den 31. Mai 2023
BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL
Fakultät für Management und Wirtschaftsinformatik
Management, Produktion / Prozesse /
Wuppertal
Prof. Dr. Hans-Wili Kling
(Prof. Dr. Hans-Wili Kling) Wuppertal
Tel. 0202 439-3333
Fax 0202 439-3315

A. Fontana

(Antonio Fontana, M.Sc.)